

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

КАФЕДРА ФИЗИКИ

ФИЗИКА II

Методические рекомендации
для выполнения самостоятельной работы
с индивидуальными домашними заданиями
для студентов технических специальностей
дневной и заочной форм обучения

Брест 2020

УДК 538.91, 548.73, 378.147:53

Методические рекомендации «Физика II» являются продолжением оригинальной методической разработки кафедры физики для решения «Комплексных задач по физике». В «Физику I» вошли три первые комплексные задачи по разделу «Механика и молекулярная физика»: «Динамика поступательного и вращательного движения», «Динамика вращения и законы сохранения» и «Молекулярная физика». В «Физику II» входят три комплексные задачи по разделу «Электричество и магнетизм»: «Электрическое поле в вакууме», «Постоянный электрический ток» и «Магнитное поле в вакууме». Методические указания позволяют студенту самостоятельно разобраться с решением той или иной задачи. Все задачи имеют индивидуальные задания.

Методические рекомендации предназначены для студентов технических специальностей дневной и заочной форм обучения, изучающих дисциплину «Физика».

Составители: М. М. Барковская, доцент, к. физ.-мат. наук,
А. А. Гладыщук, доцент, к. физ.-мат. наук, доцент,
О. Ф. Савчук, ассистент

Рецензент: В. И. Шиманский, к. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики
твёрдого тела Белорусского государственного университета

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
ЗАДАЧА 4. Электростатическое поле в вакууме	6
Порядок выбора численных данных и рисунков к задаче 4 «Электростатическое поле в вакууме».....	23
Численные данные и рисунки к задаче 4 «Электростатическое поле в вакууме».....	24
ЗАДАЧА 5. Постоянный электрический ток.....	27
Численные данные к задаче 5 «Постоянный электрический ток»	35
Рисунки схем электрической цепи к задаче 5 «Постоянный электрический ток».....	36
ЗАДАЧА 6. Магнитное поле постоянных токов.	41
Численные данные к задаче 6 «Магнитное поле постоянных токов»	51
Рисунки к задаче 6 «Магнитное поле постоянных токов».....	52
Список литературы.....	54

ВВЕДЕНИЕ

Общепризнана роль задач как фактора, в решающей мере влияющего на степень активного усвоения программного материала, потенциальные возможности его применения в последующей профессиональной деятельности инженера и обеспечивающего актуализацию знаний по физике. Реализация этой роли в качестве важного исходного элемента предполагает рациональный подбор задач. Анализ существующих сборников задач по физике показывает, что по курсу физики технических университетов имеется примерно 700 задач, исчерпывающих содержание этого курса в фактическом и идейном плане и реализующих нетривиальное взаимодействие идей и подходов, что составляет примерно 10 % от общего числа различных задач во всей имеющейся учебной литературе. Однако не все из этих задач являются одинаково важными в плане реализации вышеуказанной роли. Можно выделить примерно 200 задач, решение которых представляется совершенно необходимым, что составляет около 10 задач на одну тему курса. Однако указанное число задач явно превышает возможности студента, поэтому в большинстве технических университетов количество решаемых задач значительно меньше со всеми вытекающими из этого последствиями. Ситуация осложняется также и тем, что по многим причинам представляется совершенно необходимой индивидуализация заданий.

В качестве одной из возможных альтернатив предлагается использование комплексных задач. Это задачи, в которых на едином материале рассматривается весь комплекс вопросов и идей достаточно большой темы курса. Существенной частью комплексных задач является надлежаще подобранный и организованный графический материал в виде схем, диаграмм, рисунков и т. д. Любое задание имеет до 100 вариантов. Каждый вариант включает 7–10 задач, решение которого требует ясного понимания основного материала темы, дает возможность отработать методику применения основных законов, сформировать общее представление о характере задач, решаемых в данном разделе, и фиксирует внимание студентов на узловых вопросах и типичных моментах взаимодействия идей и представлений раздела.

Универсальность комплексных задач позволяет использовать их не только для обучения, но и как материал для контроля полученных знаний. Методически обсуждение комплексных задач со студентами на практических занятиях несколько отличается от традиционно принятой формы и требует от преподавателя разумной импровизации. Как правило, студентом комплексная задача, как единое целое, не решается. Преподаватель разбивает условно всю комплексную задачу на блоки, каждый из которых представляет собой микрозадачу, объединенную с другими общим условием и темой. Внутри блока преподаватель может по своему усмотрению и в зависимости от исходной подготовки студентов варьировать материал, менять методику решения и т. д., но на выходе он получает результат, который логически связан с последующими блоками-задачами и используется дальше как необходимое условие. Для закрепления навыков студенты получают промежуточные задания, имитирующие задачи-блоки, что позволяет им разобраться самостоятельно в тонкостях приемов решения и вы-

числения. По завершении изучения темы каждому студенту выдается индивидуальная комплексная задача, которая является его обязательным домашним заданием. Следует отметить, что такой подход решает еще одну важную проблему: организацию индивидуальных занятий студентов под руководством преподавателя.

Количество комплексных задач, предлагаемых студентам в семестре, определяется изучаемыми разделами физики, а объем заданий в комплексной задаче варьируется в зависимости от числа часов, отводимых на изучение соответствующих тем.

Н. И. Чопчиц

ЗАДАЧА 4. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ВАКУУМЕ

Условие: Система заряженных тел может состоять из точечных зарядов, прямолинейных стержней, тонкого кольца, а также тонкого сплошного или с круглым отверстием (согласно Вашему варианту) диска. Тонкий диск или тонкое кольцо могут быть расположены в одной из координатных плоскостей, перпендикулярных плоскости рисунка, и симметрично началу координат (рисунок 4.0). Тонкие прямолинейные стержни A_1B_1 и A_2B_2 лежат в плоскости рисунка и перпендикулярны одной из координатных осей.

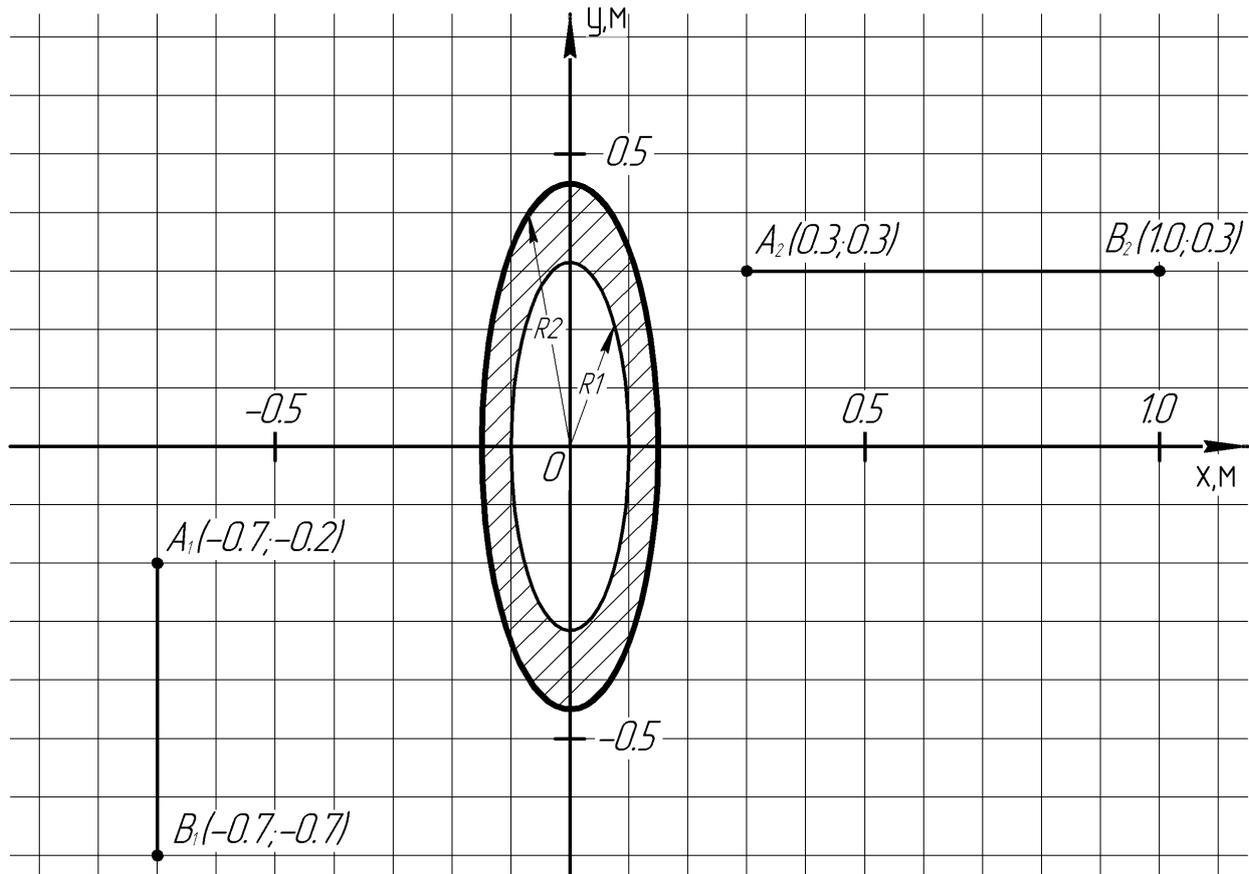


Рисунок 4.0 – расположение заряженных тел

Электрические заряды могут быть распределены следующим образом:

- точечные заряды q_1, q_2 и q_3, q_4 , расположенные в точках A_1, B_1 и A_2, B_2 соответственно, имеют разные величины и знаки зарядов;
- тонкие прямолинейные стержни A_1B_1 и A_2B_2 равномерно заряжены с линейной плотностью заряда τ_1 и τ_2 соответственно;
- тонкое кольцо с радиусом R_2 равномерно заряжено с линейной плотностью заряда τ_1 ;
- тонкий диск с радиусом R_2 равномерно заряжен с поверхностной плотностью заряда σ . Тонкий диск может быть сплошным или с круглым отверстием с радиусом R_1 .

Считать, что диэлектрическая проницаемость среды, в которой находится система заряженных тел, равна $\epsilon = 1$. Координаты точек A_1, B_1 и A_2, B_2 заданы в

метрах. На всех телах, кроме точечных зарядов, равномерно распределён положительный заряд.

Задание 1. Согласно рисунку Вашего варианта, самостоятельно выберите точку C с координатой X_c (или Y_c) на оси, перпендикулярной плоскости тонкого диска. Найдите величину и направление вектора напряжённости электростатического поля $\vec{E}_{1,2}$ в точке C , создаваемого точечными зарядами q_1 и q_2 .

Решение: Подготовим рисунок, иллюстрирующий условие задания. На нём изобразим только точечные заряды q_1 и q_2 расположенные в точках A_1 и B_1 соответственно (рисунок 4.0 а). В нашем случае точечные заряды имеют различные знаки. Поскольку тонкий диск расположен в плоскости, перпендикулярной оси OX , то выберем точку C с координатой X_c (значение самой координаты пока не задаём).

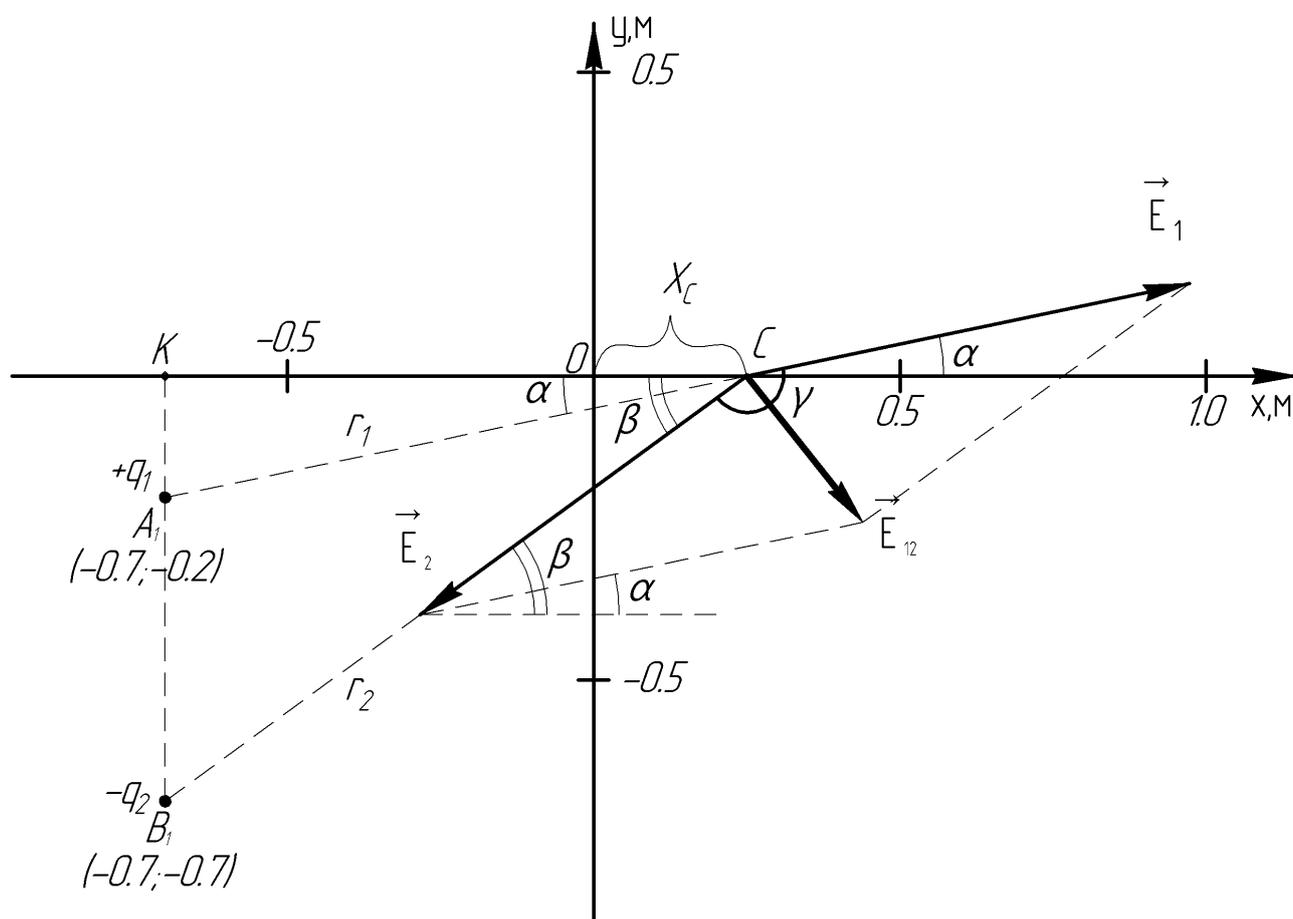


Рисунок 4.0 а – напряжённость электростатического поля, создаваемого точечными зарядами

Примечание 4.1. Напряжённость \vec{E} является основной силовой характеристикой электростатического поля. Согласно закону Кулона напряжённость электрического поля, создаваемая точечным зарядом, равна:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q}{r^2} \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}, \quad (4.1)$$

где $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ – коэффициент в системе СИ, $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{Кл}^2}$;

ϵ_0 – электрическая постоянная, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$;

q – величина точечного заряда;

r – расстояние от точечного заряда до точки, в которой определяется напряжённость электрического поля;

$\frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$ – единичный вектор, задающий направление напряжённости электрического поля в данной точке.

Обратим внимание, что закон Кулона сформулирован только для точечных зарядов.

Силовые линии электростатического поля – это условные линии, в любой точке которых направление напряжённости электростатического поля совпадает с касательной.

Заметим также, что силовые линии электростатического поля принято начинать на положительных зарядах и заканчивать на отрицательных зарядах, поэтому вектор \vec{E}_1 направлен от положительного заряда по линии, соединяющей т. A_1 с точкой C (см. рисунок 4.0 а), а вектор \vec{E}_2 – направлен соответственно к отрицательному заряду $-q_2$.

Из рисунка 4.0 а следует, что величины напряжённостей E_1 и E_2 электростатического поля в т. C согласно закону Кулона (4.1) равны соответственно:

$$E_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r_1^2} \quad \text{и} \quad E_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2}{r_2^2}. \quad (4.2)$$

Расстояние r_1 (или r_2) можно найти, построив прямоугольный треугольник с вершинами A_1 (или B_1), C и K (см. рисунок 4.0 а). Здесь точка K – это точка пересечения линии, соединяющей точечные заряды q_1 и q_2 и ось координат OX . В нашем случае точка K имеет координаты $(-0,7; 0)$. Гипотенуза полученного треугольника – это расстояние от точечного заряда до точки C , которое можно определить по теореме Пифагора.

В нашем случае расстояния r_1 и r_2 будут определяться следующим образом:

$$r_1^2 = 0,2^2 + (0,7 + x_C)^2, \quad r_2^2 = 0,7^2 + (0,7 + x_C)^2. \quad (4.3)$$

Так как \vec{E}_1 и \vec{E}_2 – вектора, то суммарная напряжённость электростатического поля в т. C в соответствии с принципом суперпозиции будет равна векторной сумме $\vec{E}_{1,2} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$.

Примечание 4.2. Принцип суперпозиции. Напряжённость электростатического поля в данной точке равна векторной сумме всех напряжённостей, создаваемых в данной точке отдельными точечными зарядами:

$$\vec{E} = \sum_i \vec{E}_i. \quad (4.4)$$

Векторы \vec{E}_1 и \vec{E}_2 можно сложить по правилу параллелограмма и, воспользовавшись теоремой косинусов, вычислить значение вектора напряжённости поля $\vec{E}_{1,2}$ в точке C :

$$E_{1,2} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 - 2E_1E_2 \cos(180^\circ - \gamma)} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos \gamma}, \quad (4.5)$$

где γ – угол между векторами напряжённостей \vec{E}_1 и \vec{E}_2 (см. рисунок 4.0 а).

Примечание 4.3. Теорема косинусов. Если в треугольнике известны две стороны a и b и угол θ между ними, то третья сторона c находится, как

$$c = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos \theta}. \quad (4.6)$$

Так как тангенсы углов α и β (см. рисунок 4.0 а) вычисляются из заданных условий как:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{0,2}{0,7 + x_c}, \quad \operatorname{tg} \beta = \frac{0,7}{0,7 + x_c},$$

то углы α и β могут быть вычислены как arctg соответствующих величин.

Величину результирующего вектора напряжённости электростатического поля в точке C $E_{1,2}$ можно найти по формуле (4.5), записанной согласно теореме косинусов (4.6), а для того, чтобы найти направление вектора $\vec{E}_{1,2}$, необходимо вычислить углы параллелограмма: острый угол параллелограмма равен $(\beta - \alpha)$, тогда как тупой угол параллелограмма γ (см. рисунок 4.0 а) будет равен:

$$\gamma = \frac{360^\circ - 2(\beta - \alpha)}{2}.$$

Таким образом, задав самостоятельно численное значение координаты X_C , вычислите величину напряжённости электростатического поля $E_{1,2}$ в точке C , создаваемого точечными зарядами q_1 и q_2 (4.5), записав ответ в B/m .

Направление же вектора напряжённости поля $\vec{E}_{1,2}$ в точке C определить по углу отклонения вектора $\vec{E}_{1,2}$ от оси OX (рисунок 4.0 а).

Задание 1*. Аналогично заданию 1, найдите величину и направление вектора напряжённости электростатического поля $\vec{E}_{3,4}$ в точке C , создаваемого точечными зарядами q_3 и q_4 . Точечные заряды расположены в точках A_2 и B_2 соответственно.

Найдите также результирующий вектор напряжённости электростатического поля \vec{E}_C (величину и направление) в точке C , создаваемого всеми четырьмя точечными зарядами, как векторную сумму векторов $\vec{E}_{1,2}$ и $\vec{E}_{3,4}$:

$$\vec{E}_C = \vec{E}_{1,2} + \vec{E}_{3,4}. \quad (4.7)$$

Задание 2. Найдите величину и направление вектора напряжённости электростатического поля $\vec{E}_{A_1B_1}$ в точке C , создаваемого тонким равномерно заряженным стержнем A_1B_1 с линейной плотностью заряда τ_1 .

Решение: Подготовим рисунок, на котором изобразим только тонкий заряженный стержень A_1B_1 и точку C с координатой X_C , в которой необходимо вычислить создаваемую стержнем напряжённость электростатического поля (рисунок 4.0 b).

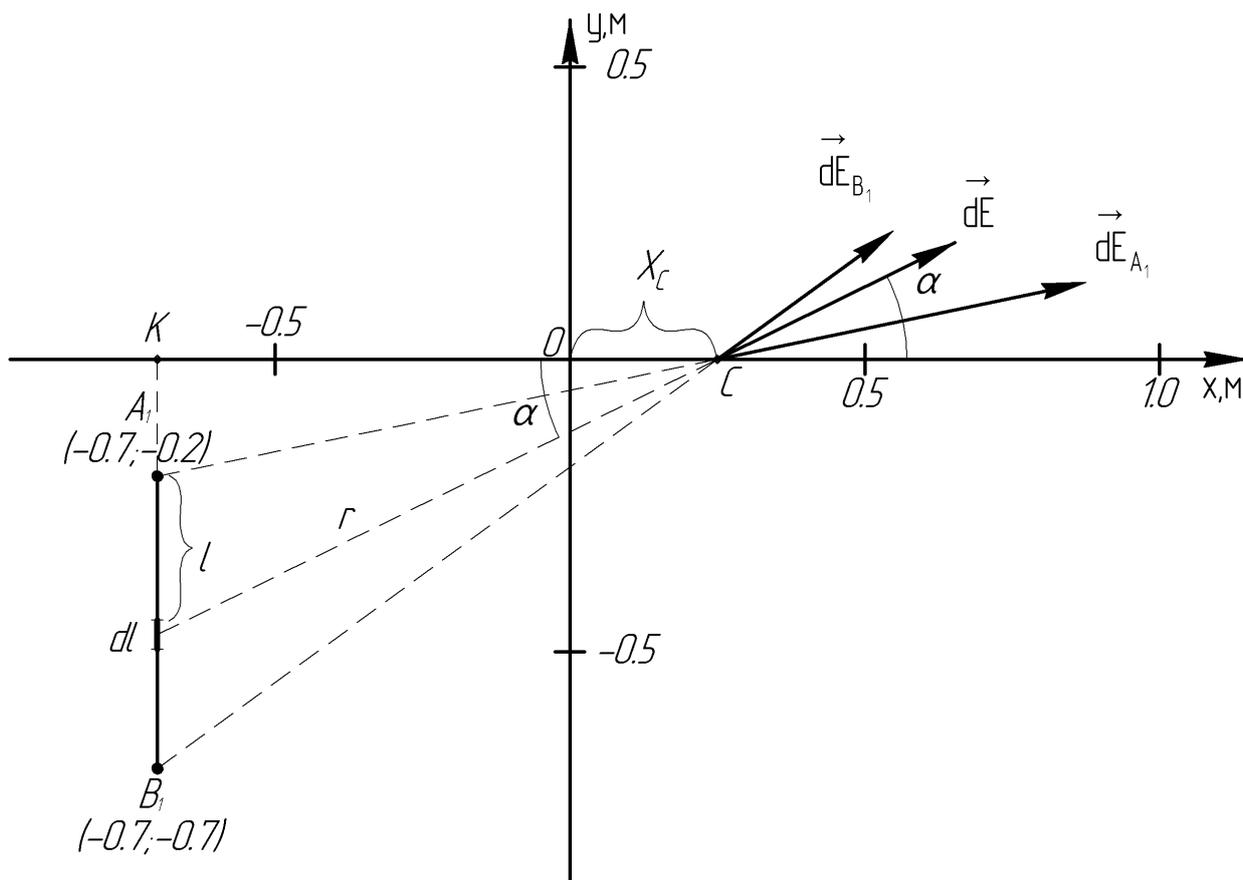


Рисунок 4.0 b – напряжённость электростатического поля, создаваемого тонким заряженным стержнем

Так как закон Кулона сформулирован для точечных электрических зарядов, чтобы воспользоваться им, тонкий стержень A_1B_1 необходимо условно поделить на небольшие участки длиной dl , которые будут содержать точечные за-

ряды величиной $dq = \tau_1 \cdot dl$, где τ_1 – линейная плотность заряда (заряд, приходящийся на единицу длины), а dl – элементарный участок стержня. Тогда согласно закона Кулона (6.1):

$$\vec{dE} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{dq}{r^2} \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}, \quad (4.8)$$

где $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ – коэффициент (см. задание 1);

dq – элементарный точечный заряд ($dq = \tau_1 \cdot dl$);

r – расстояние от заряда dq до точки C ;

$\frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$ – единичный вектор, задающий направление напряжённости \vec{E} .

Выделим произвольно (т. е. в любом месте) на стержне A_1B_1 (считаем, что стержень несёт положительный заряд) элементарный участок dl с точечным зарядом $dq = \tau_1 \cdot dl$ и построим прямоугольный треугольник $dl K C$, считая dl точкой. Тогда катеты прямоугольного треугольника будут соответственно равны $(l+0,2)$ и $(0,7+X_C)$, а гипотенузой будет являться r – расстояние от произвольно выделенного участка dl до точки C .

Обратим внимание, что длина l здесь задаётся произвольно. Угол между катетом $(0,7+X_C)$ и гипотенузой r обозначим через α .

Так как требуется вычислить напряжённость электрического поля в точке C , создаваемую заряженным стержнем, то нетрудно заметить, что при переходе от одного выбранного элемента длины стержня к другому направление вектора \vec{dE} также будет меняться от начального направления \vec{dE}_A (см. рисунок 4.0 b) до конечного направления \vec{dE}_B . Это вынуждает процедуру нахождения вектора $\vec{E}_{A_1B_1}$ разбить на два этапа: вначале найти проекции вектора $\vec{E}_{A_1B_1}$ на оси координат $E_{A_1B_1}^x$ и $E_{A_1B_1}^y$, а потом по теореме Пифагора найти величину самого вектора:

$$E_{A_1B_1} = \sqrt{(E_{A_1B_1}^x)^2 + (E_{A_1B_1}^y)^2}. \quad (4.9)$$

Запишем проекции вектора \vec{dE} (см. рисунок 4.0 b) на оси координат X и Y через угол α :

$$dE_x = dE \cdot \cos\alpha, \quad (4.10)$$

$$dE_y = dE \cdot \sin\alpha, \quad (4.11)$$

где α – угол между \vec{r} и осью OX .

Здесь согласно закону Кулона (4.8) $dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\tau dl}{r^2}$ ($\epsilon=1$),

$$\text{тогда } dE_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\tau_1 dl}{r^2} \cos\alpha. \quad (4.12)$$

Выражение аналогичное (4.12) требуется записать для каждого элемента длины заряженного стержня dl , на которые условно разбит стержень A_1B_1 для того, чтобы можно было воспользоваться законом Кулона. Но эту задачу нам помо-

жет решить интегрирование (суммирование) всех напряжённостей в точке C , создаваемых отдельными элементами длины стержня (см. принцип суперпозиции).

Из прямоугольного треугольника с вершинами dl , K и C согласно рисунку 4.0 b , запишем:

$$\cos \alpha = \frac{0,7 + X_C}{r}.$$

Откуда

$$r = \frac{0,7 + X_C}{\cos \alpha}. \quad (4.13)$$

Из того же треугольника:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{0,2 + l}{0,7 + X_C}. \quad (4.14)$$

Чтобы выразить dl необходимо выражение (4.14) продифференцировать, т. е. от левой и правой части найти производную и умножить на соответствующие дифференциалы dl и $d\alpha$:

$$(\operatorname{tg} \alpha)'_{\alpha} = \left(\frac{0,2 + l}{0,7 + X_C} \right)'_l.$$

Здесь значок «'» означает действие дифференцирования слева по углу α , а справа по длине l .

Тогда получаем

$$\frac{1}{\cos^2 \alpha} d\alpha = \frac{1}{0,7 + X_C} dl.$$

Откуда выразим

$$dl = \frac{0,7 + X_C}{\cos^2 \alpha} \cdot d\alpha, \quad (4.15)$$

где X_C – фиксированная координата.

Подставив выражения для r (4.13) и dl (4.15) в выражение (4.12), получаем:

$$dE_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\tau_1 dl}{r^2} \cos \alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \tau_1 \cdot \cos \alpha \cdot \frac{0,7 + X_C}{\cos^2 \alpha} \cdot d\alpha \cdot \frac{\cos^2 \alpha}{(0,7 + X_C)^2}.$$

После сокращения получим:

$$dE_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \tau_1 \cdot \frac{1}{0,7 + X_C} \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha. \quad (4.16)$$

Заметим, что в выражении (4.16) осталась только одна переменная величина – угол α , а остальные величины, входящие в выражение (4.16) $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, τ_1 ,

$\frac{1}{0,7 + X_C}$ являются постоянными.

Тогда, интегрируя выражение (4.16), в соответствии с принципом суперпозиции найдем проекцию вектора напряженности $\vec{E}_{A_1B_1}$ на ось OX , т. е. $E_{A_1B_1}^x$. Запишем интеграл выражения (4.16):

$$E_{A_1B_1}^x = \int dE_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \tau_1 \frac{1}{0,7 + X_c} \int \cos\alpha \, d\alpha. \quad (4.17)$$

Примечание 4.4. Из таблицы неопределённых интегралов известно:

$$\int \cos\alpha \, d\alpha = \sin\alpha + C,$$

$$\int \sin\alpha \, d\alpha = -\cos\alpha + C, \text{ где } C - \text{постоянная интегрирования.}$$

В нашем случае тонкий стержень A_1B_1 имеет конечную длину, поэтому значения угла α будут меняться в диапазоне от α_1 для точки A_1 до α_2 для точки B_1 (рисунок 4.0 b). Здесь значения углов α_1 и α_2 будут являться нижним и верхним пределами интегрирования, т. е. интеграл в выражении (4.17) вычисляется как определённый:

$$\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \cos\alpha \, d\alpha = \sin\alpha \Big|_{\alpha_1}^{\alpha_2} = \sin\alpha_2 - \sin\alpha_1. \quad (4.18)$$

Значения углов α_1 и α_2 вычислите из соответствующих прямоугольных треугольников (см. рисунок 4.0 b).

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\alpha_1 &= \frac{0,2}{0,7 + X_c}, & \alpha_1 &= \operatorname{arctg} \frac{0,2}{0,7 + X_c}, \\ \operatorname{tg}\alpha_2 &= \frac{A_1B_1 + 0,2}{0,7 + X_c}, & \alpha_2 &= \operatorname{arctg} \frac{A_1B_1 + 0,2}{0,7 + X_c}. \end{aligned} \quad (4.19)$$

Длина стержня A_1B_1 определяется по координатам Вашего варианта, значение координаты X_c задайте при вычислении самостоятельно.

Подставив в выражения (4.18 и 4.17) численные значения Вашего варианта и вычисленные пределы интегрирования, находим значение проекции вектора напряжённости $\vec{E}_{A_1B_1}$ на ось OX , т.е. $E_{A_1B_1}^x$.

Проекцию вектора напряжённости $\vec{E}_{A_1B_1}$ на ось OY , т. е. $E_{A_1B_1}^y$, будем искать, действуя аналогичным образом:

$$dE_y = dE \cdot \sin\alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\tau_1 \, dl}{r^2} \sin\alpha. \quad (4.20)$$

Используя замены переменных величин r (4.13) и dl (4.15), запишем:

$$\begin{aligned}
 dE_y &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \tau_1 \sin\alpha \frac{0,7 + X_C}{\cos^2\alpha} d\alpha \frac{\cos^2\alpha}{(0,7 + X_C)^2} = \\
 &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \tau_1 \frac{1}{0,7 + X_C} \sin\alpha d\alpha.
 \end{aligned}
 \tag{4.21}$$

Тогда интегрируя выражение (4.21), получаем, что

$$\begin{aligned}
 E_{A_1B_1}^y &= \int dE_y = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \tau_1 \frac{1}{0,7 + X_C} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin\alpha d\alpha = \\
 &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \tau_1 \frac{1}{0,7 + X_C} (-\cos\alpha)|_{\alpha_1}^{\alpha_2} = \\
 &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \tau_1 \frac{1}{0,7 + X_C} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2).
 \end{aligned}
 \tag{4.22}$$

Примечание 4.5. Знак минус перед интегралом меняет местами пределы интегрирования:

$$-\int_b^a f(x)dx = \int_a^b f(x)dx.$$

Подставив численные данные, найдите проекцию вектора $\vec{E}_{A_1B_1}$ на ось OY , т. е. $E_{A_1B_1}^y$.

Таким образом, величина напряжённости электростатического поля $E_{A_1B_1}$ в точке C , создаваемого заряженным тонким стержнем A_1B_1 , будет равна

$$E_{A_1B_1} = \sqrt{(E_{A_1B_1}^x)^2 + (E_{A_1B_1}^y)^2}. \tag{4.23}$$

Направление вектора $\vec{E}_{A_1B_1}$ к оси OX можно вычислить как

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{E_{A_1B_1}^y}{E_{A_1B_1}^x}, \tag{4.24}$$

где γ – угол между вектором $\vec{E}_{A_1B_1}$ и положительным направлением оси OX .

Задание 2*. Аналогично заданию 2 найдите величину и направление вектора напряжённости электростатического поля $\vec{E}_{A_2B_2}$ в точке C , создаваемого тонким стержнем A_2B_2 , равномерно заряженным с линейной плотностью τ_2 .

Решение: Подготовьте рисунок согласно Вашему варианту аналогично рисунку 4.0 b, показав на нём только тонкий заряженный стержень A_2B_2 и точку C с координатой X_c (или Y_c), в зависимости от варианта, в которой необходимо вычислить напряжённость поля, создаваемого заряженным тонким стержнем.

Для нахождения величины вектора напряжённости электростатического поля $\vec{E}_{A_2B_2}$ в точке C , действуя как в задании 2, с поправкой на местоположение и ориентацию стержня A_2B_2 , выполните следующее:

- найдите проекции вектора напряжённости $\vec{E}_{A_2B_2}$ на оси координат OX и OY , применяя интегрирование: $E_{A_2B_2}^x$ и $E_{A_2B_2}^y$;
- вычислите по теореме Пифагора величину $E_{A_2B_2} = \sqrt{(E_{A_2B_2}^x)^2 + (E_{A_2B_2}^y)^2}$ и направление вектора $\vec{E}_{A_2B_2}$;
- запишите полученный ответ, подставив значение соответствующей координаты, сохранив её значение из предыдущих заданий.

Примечание 4.6. При вычислении проекций вектора \vec{dE} на оси OX и OY необходимо обращать внимание на знаки проекций. Так, например, в нашем случае (рисунок 4.0) для стержня A_2B_2 проекции dE_x и dE_y будут иметь отрицательный знак.

Примечание 4.7. При вычислениях необходимо также обращать внимание на положение точки C , в которой вычисляется напряжённость электростатического поля. Если точка C имеет координату большую, чем начало стержня и меньшую, чем его окончание, то тогда одна из проекций (в нашем случае E_x) будет в процессе вычисления менять свой знак.

Это означает, что результат в вычислении даёт только та часть стержня, которая остаётся от скомпенсированных одинаковых участков вправо и влево от точки C . Поэтому вычисляя предельные углы интегрирования, этот момент необходимо учитывать, откладывая углы от одной линии и в одну сторону, как правило, против часовой стрелки.

Задание 3. Найдите величину и направление вектора напряжённости электростатического поля \vec{E}_{R_2} в точке C , создаваемого тонким заряженным кольцом. Тонкое кольцо с радиусом R_2 равномерно заряжено с линейной плотностью заряда τ_1 .

Решение: Подготовьте рисунок, на котором покажем только тонкое кольцо с радиусом R_2 и точку C с координатой X_C , в которой необходимо вычислить напряжённость электростатического поля, создаваемого кольцом (рисунок 4.0 с).

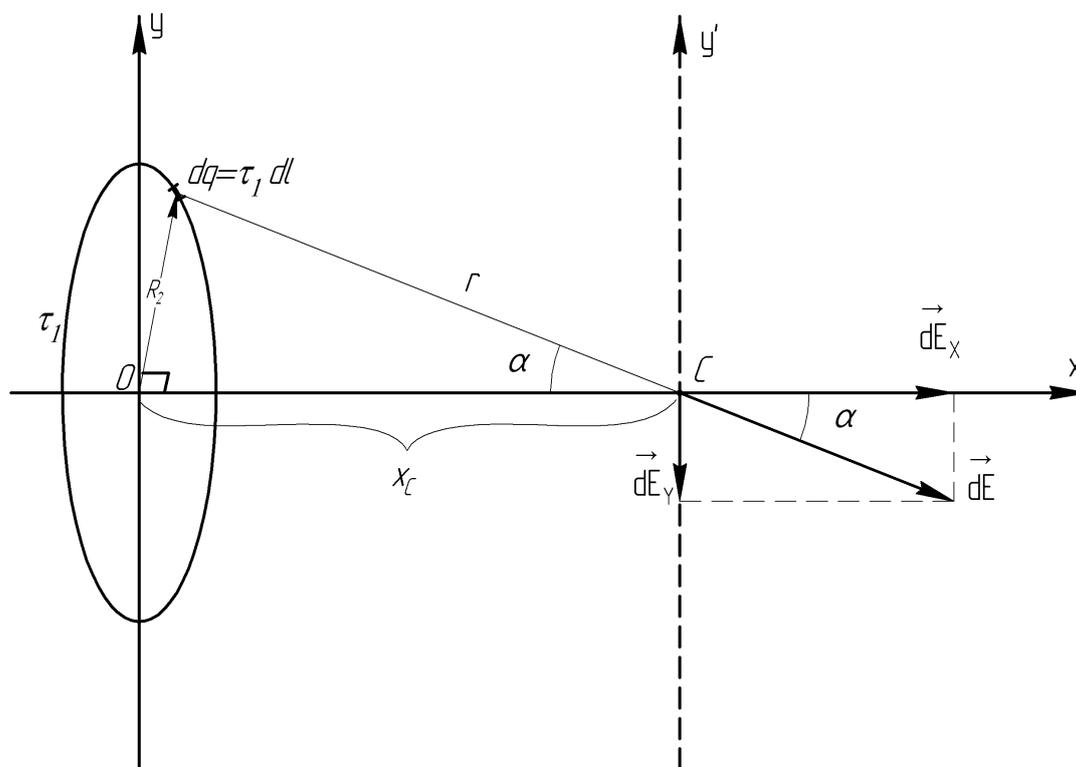


Рисунок 4.0 с – напряжённость электростатического поля, создаваемого тонким кольцом

Так как закон Кулона можно применять только для точечных зарядов, то тонкое заряженное кольцо радиусом R_2 необходимо также условно разбить на элементарные участки длиной dl , заряд на которых можно принять за точечный $dq = \tau_1 dl$.

Тогда, согласно закону Кулона (4.1), точечный заряд dq создаст в точке C электростатическое поле с напряжённостью:

$$\vec{dE} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{dq}{r^2} \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}. \quad (4.25)$$

Отметим, что для данного случая постоянными сохраняются R_2 , r и угол α (см. рисунок 4.0 с). Очевидно, что при перемещении от одного участка dl кольца к другому вектор \vec{dE} будет вращаться вокруг точки C , образовав в результате замкнутую коническую поверхность. Но ввиду симметрии этой поверхности, проекции вектора \vec{dE} на все другие направления, кроме оси X в нашем случае, будут взаимно компенсировать друг друга. Это объясняется тем, что для каждого участка отрезком dl с зарядом dq существует диаметрально противоположный такой же участок с таким же зарядом.

Это означает, что результирующая напряжённость электростатического поля, создаваемая заряженным тонким кольцом, будет направлена для нашего случая (рисунок 4.0 с) по оси X , т. е. необходимо вычислить только $E_{R_2}^x$, поскольку теперь складываются только сонаправленные вектора \vec{dE}_x .

Так как $dE_x = dE \cdot \cos\alpha$ (см. рисунок 4.0 с), то согласно (4.25), выразив заряд dq через линейную плотность заряда τ_1 ($dq = \tau_1 dl$), запишем:

$$dE_x = dE \cdot \cos\alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\tau_1 dl}{r^2} \cos\alpha. \quad (4.26)$$

Как видно из рисунка 4.0 с, расстояние r между точечным зарядом dq и точкой C можно определить из прямоугольного треугольника с вершинами O , dl и C . Согласно теореме Пифагора запишем $r^2 = R_2^2 + X_C^2$. Так как $\cos\alpha = \frac{X_C}{r} = \frac{X_C}{\sqrt{R_2^2 + X_C^2}}$, то

$$dE_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \tau_1 \frac{X_C}{(R_2^2 + X_C^2)^{3/2}} dl. \quad (4.27)$$

В выражении (4.27) переменной является только одна величина dl . Произведя интегрирование по всей длине кольца, т. е. переменная dl меняется в пределах от 0 до $2\pi R_2$, получаем:

$$E_{R_2}^x = \int dE_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \tau_1 \frac{X_C}{(R_2^2 + X_C^2)^{3/2}} \int_0^{2\pi R_2} dl, \quad (4.28)$$

где $2\pi R_2$ – длина кольца.

Вычислив определенный интеграл $\int_0^{2\pi R_2} dl = l|_0^{2\pi R_2} = 2\pi R_2$, получаем, что напряжённость электростатического поля в точке C , создаваемого тонким равномерно заряженным кольцом, равна:

$$E_{R_2}^x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \tau_1 \frac{X_C}{(R_2^2 + X_C^2)^{3/2}} \cdot 2\pi R_2 = \frac{R_2}{2\epsilon_0} \tau_1 \frac{X_C}{(R_2^2 + X_C^2)^{3/2}}. \quad (4.29)$$

Подставьте численные данные и вычислите значение напряжённости $E_{R_2}^x$, выразив ответ в **В/м**. Значение координаты X_C сохраняется таким, как и в предыдущих заданиях.

Задание 4. Найдите величину и направление вектора напряжённости электростатического поля \vec{E}_σ в точке C , создаваемого равномерно заряженным тонким диском с радиусом R_2 и поверхностной плотностью заряда σ . Точка C находится на оси симметрии диска, совпадающей с одной из координатных осей. В тонком диске может быть круглое отверстие с радиусом R_1 (согласно варианту Вашей задачи диск может быть сплошным или с круглым отверстием в центре).

Решение: Подготовим рисунок, иллюстрирующий условие задания, на котором покажем только тонкий диск с круглым отверстием и точку C с координатой X_c , в которой необходимо вычислить создаваемую диском напряжённость электростатического поля (рисунок 4.0 d).

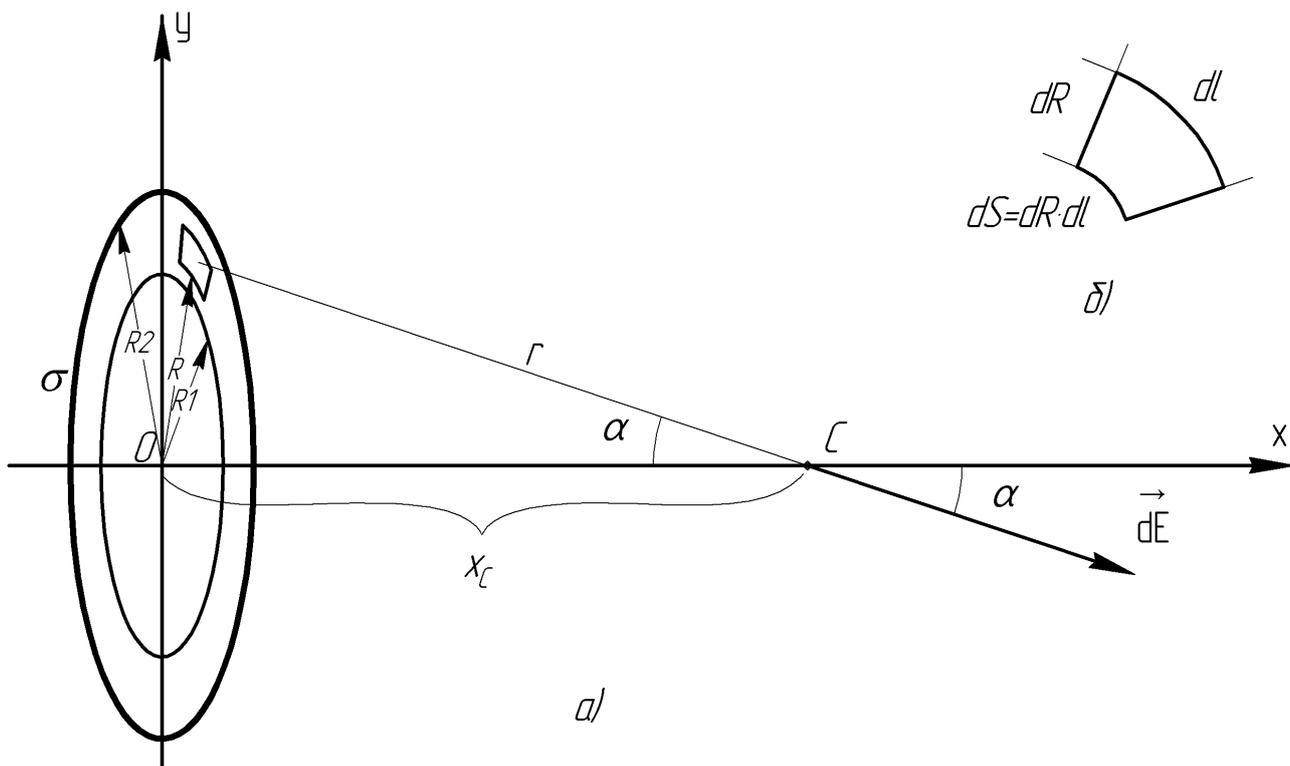


Рисунок 4.0 d – напряжённость электростатического поля, создаваемого тонким диском, (а) и элементарная поверхность dS диска (б)

Закон Кулона (4.1) требует выделить на плоском диске элементарную поверхность $dS = dR dl$ (вставка б) к рисунку 4.0 d, где будет сосредоточен точечный заряд:

$$dq = \sigma \cdot dS = \sigma \cdot dR \cdot dl. \quad (4.30)$$

Для проведения вычислений разобьём условно диск на concentric тонкие кольца dR , которые также условно поделим на одинаковые участки малой длины dl . Радиус concentric тонких колец будет изменяться от R_1 до R_2 , а их длина соответственно от 0 до $2\pi R_1 \div 2\pi R_2$. Таким образом, вычисление напряжённости электростатического поля в точке C разбивается на два этапа:

1-й этап – вычисление напряжённости электростатического поля в точке C для тонкого кольца dR и с произвольным радиусом $R_1 < R < R_2$ (см. задание 3);

2-й этап – суммарное вычисление напряжённости электростатического поля в точке C для всех тонких колец dR и радиусами от R_1 до R_2 .

Другими словами, необходимо провести интегрирование (принцип суперпозиции) в два этапа. В математике это называют *двойным интегрированием*.

1-й этап: Напряжённость электростатического поля в точке C , создаваемого тонким кольцом dR с радиусом R (где $R_1 \leq R \leq R_2$), можно вычислить аналогично заданию 3. Тонкое кольцо условно поделим на одинаковые малые участки длиной dl , и заряд dq , находящийся на участке длиной dl , примем за точечный.

Выполнив действия, аналогичные заданию 3 (см. формулы 4.25 – 4.29), получим, что напряжённость электростатического поля в точке C , создаваемого одним тонким кольцом dR радиусом R , равна:

$$E_R^x = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \sigma \frac{X_C}{(R^2 + X_C^2)^{3/2}} dR \int_0^{2\pi R} dl = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \sigma \frac{X_C}{(R^2 + X_C^2)^{3/2}} dR \cdot 2\pi R. \quad (4.31)$$

Здесь пределы интегрирования по тонкому кольцу от 0 до $2\pi R$.

Упростив выражение, получаем:

$$E_R^x = \frac{X_C}{2\varepsilon_0} \sigma \frac{R dR}{(R^2 + X_C^2)^{3/2}}. \quad (4.32)$$

Следует отметить, что в силу симметрии задачи проекция напряжённости на ось Y : $E_R^y = \int dE_y = 0$.

2-й этап: Найдём напряжённость поля в точке C , создаваемую всеми тонкими кольцами dR . Для этого полученное выражение (4.32) проинтегрируем ещё раз, но уже по переменной R , которая изменяется в пределах от R_1 до R_2 .

$$E_\sigma^x = \frac{X_C}{2\varepsilon_0} \sigma \int_{R_1}^{R_2} \frac{R dR}{(R^2 + X_C^2)^{3/2}}. \quad (4.33)$$

Этот интеграл требует замены переменных: $R^2 + X_C^2 = y$, где y – новая переменная, тогда $dy = 2R dR$ (дифференцируем выражение $R^2 + X_C^2$, принимая X_C^2 за постоянную).

Перепишем выражение (4.33) через новую переменную:

$$E_\sigma^x = \frac{X_C}{2\varepsilon_0} \sigma \frac{1}{2} \int_{R_1}^{R_2} \frac{dy}{y^{3/2}}. \quad (4.34)$$

Используя формулу табличных интегралов, вычислим неопределённый интеграл как $\int \frac{dy}{y^{3/2}} = -\frac{2}{\sqrt{y}} + C$.

Подставив пределы интегрирования в выражение (4.34) и возвращаясь к старой переменной $R^2 + X_C^2$, окончательно получаем:

$$E_\sigma^x = \frac{X_C}{2\varepsilon_0} \sigma \left(-\frac{1}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} \right) \Big|_{R_1}^{R_2} = \frac{X_C}{2\varepsilon_0} \sigma \left(\frac{1}{\sqrt{R_1^2 + X_C^2}} - \frac{1}{\sqrt{R_2^2 + X_C^2}} \right). \quad (4.35)$$

Следует учесть, что в выражении (4.35) подстановка пределов интегрирования выполнена с учетом *примечания 4.5*.

Подставив численные данные, вычислите значение напряжённости поля E_σ^x в точке C , которое создает тонкий заряженный диск, выразив ответ в **В/м**. Значение координаты X_C сохраняется таким, как и в предыдущих заданиях.

Задание 5. Найдите графически и вычислите аналитически величину и направление результирующего вектора напряжённости электростатического поля \vec{E}_C в точке C , создаваемую линейно заряженными тонкими стержнями A_1B_1 и A_2B_2 с линейной плотностью заряда, соответственно, τ_1 и τ_2 , а также плоским тонким диском, несущим на себе заряд с поверхностной плотностью σ .

Решение: Выпишем сначала полученные в заданиях 2, 2* и 4 значения проекций напряжённостей электростатических полей для стержней A_1B_1 и A_2B_2 и тонкого диска с учетом их знаков. В нашем случае (см. рисунок 4.0) полученные результаты с учетом их знака будут следующими:

$$+ E_{A_1B_1}^x; + E_{A_1B_1}^y; - E_{A_2B_2}^x; - E_{A_2B_2}^y; + E_\sigma^x.$$

Отметим, что знак напряжённости $E_{A_2B_2}^x$ зависит от значения координаты X_C , которая задаёт положение точки C относительно стержня A_2B_2 .

Затем запишем проекции результирующего вектора напряжённости электростатического поля как алгебраическую сумму проекций на оси координат каждого из тел с учётом их знаков:

$$\begin{aligned} E_x &= +E_{A_1B_1}^x - E_{A_2B_2}^x + E_\sigma^x; \\ E_y &= +E_{A_1B_1}^y - E_{A_2B_2}^y. \end{aligned} \quad (4.36)$$

Графическое построение

На миллиметровую бумагу нанесите координатные оси OX и OY . Выбрав соответствующий масштаб в $B/м$, на осях OX и OY отложите с учетом знака проекции вектора напряжённостей E_x и E_y (4.36) соответственно. В полученном прямоугольнике со сторонами E_x и E_y постройте диагональ (начало в точке C), которая и является результирующим вектором напряжённости \vec{E}_C . С помощью линейки измерьте длину полученной диагонали и вычислите значение результирующей напряжённости E_C с учётом выбранного Вами масштаба.

Аналитическое вычисление

Поскольку вектор напряжённости \vec{E}_C находится в плоскости XOY , то его модуль (значение) можно определить по теореме Пифагора. Так, согласно (4.36) в нашем случае получается:

$$E_C = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = \sqrt{(E_{A_1B_1}^x - E_{A_2B_2}^x + E_\sigma^x)^2 + (E_{A_1B_1}^y - E_{A_2B_2}^y)^2}. \quad (4.37)$$

Направление вектора напряжённости \vec{E}_C можно определить, рассчитав, например, угол между вектором \vec{E}_C и положительным направлением оси OX . Для этого необходимо найти $tg \gamma = \frac{E_y}{E_x}$.

Задание 6. Вычислите потенциалы электростатического поля $\varphi_{A_1B_1}$ и $\varphi_{A_2B_2}$, создаваемые тонкими равномерно заряженными стержнями A_1B_1 и A_2B_2 с линейными плотностями заряда τ_1 и τ_2 соответственно в точке C , расположенной на оси симметрии тонкого диска, проходящей через его центр.

Примечание 4.8. Потенциал электростатического поля точечного заряда в соответствии с законом Кулона равен:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q}{r}, \quad (4.38)$$

где q – точечный заряд;

r – расстояние от точечного заряда до точки, в которой определяется потенциал.

Отметим, что потенциал – это скалярная физическая величина, численно равная работе сил электростатического поля, совершаемой при перемещении единичного положительного точечного заряда по любому пути из данной точки в бесконечность. Потенциал в системе SI измеряется в В.

Решение: Согласно рисунку 4.0 *b* заряженный стержень для применения закона Кулона необходимо условно поделить на элементарные участки dl , на каждом из которых будет сосредоточен точечный элементарный заряд $dq = \tau_1 dl$. Тогда в соответствии с законом Кулона (4.38) запишем ($\epsilon = 1$):

$$d\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\tau_1 dl}{r}. \quad (4.39)$$

Из прямоугольного треугольника $dlKC$ (см. рисунок 4.0 *b*):

$$r = \sqrt{(l + 0,2)^2 + (0,7 + X_C)^2}. \quad (4.40)$$

Тогда, рассуждая как в задании 2, вычисление потенциала в точке C сводится к интегрированию (принцип суперпозиции) по всей длине заряженного стержню A_1B_1 , т. е. к вычислению интеграла:

$$\varphi_{A_1B_1} = \int d\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \tau_1 \int_{l_1}^{l_2} \frac{dl}{\sqrt{(l + 0,2)^2 + (0,7 + X_C)^2}}, \quad (4.41)$$

где l_1 – начало заряженного стержня;

l_2 – конец заряженного стержня.

Заметим, что под интегралом имеется только одна переменная l , поэтому процедуры замены переменных здесь не требуется. Пределами интегрирования будут являться значения координат начала и конца стержня. В нашем случае $l_1 = 0,2$ м, $l_2 = 0,7$ м.

Примечание 4.9. Известно, что неопределённый интеграл типа (4.41) вычисляется следующим образом:

$$\int \frac{dx}{\sqrt{(x+a)^2+b^2}} = \ln[(x+a) + \sqrt{(x+a)^2+b^2}] + C.$$

Тогда получаем, что

$$\varphi_{A_1B_1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \tau_1 \ln \left[(l+0,2) + \sqrt{(l+0,2)^2 + (0,7+X_C)^2} \right] \Big|_{l_1}^{l_2}. \quad (4.42)$$

Так как τ_1 – линейная плотность положительного заряда, то потенциал в точке C также будет положительным.

Подставив численные значения и вычтя полученное выражение для нижнего предела от выражения для верхнего предела, получим $\varphi_{A_1B_1}^C$. Ответ запишем в \mathbf{B} , сохраняя значение координаты X_C предыдущих заданий.

Действуя аналогичным образом, вычислите потенциал электростатического поля, создаваемый тонким равномерно заряженным стержнем A_2B_2 с линейной плотностью заряда $\tau_2 - \varphi_{A_2B_2}^C$. Для вычисления суммарного потенциала в точке C для двух стержней полученные значения необходимо сложить:

$$\varphi_{A_1B_1, A_2B_2}^C = \varphi_{A_1B_1}^C + \varphi_{A_2B_2}^C. \quad (4.43)$$

Задание 7. Вычислите в точке C , лежащей на оси симметрии плоского диска с радиусом R_2 и с круглым отверстием в центре с радиусом R_1 (рисунком 4.0 d), потенциал электростатического поля, создаваемый заряженным плоским тонким диском с поверхностной плотностью заряда σ . Определите суммарную величину потенциала в точке C , создаваемого заряженными стержнями A_1B_1 и A_2B_2 и плоским диском.

Согласно заданию 4 (см. рисунок 4.0 d) выделим на плоском диске элементарный заряд $dq = \sigma \cdot dS = \sigma \cdot dR \cdot dl$. Тогда для тонкого кольца dR радиусом R ($R_2 \geq R \geq R_1$), согласно (4.38), потенциал вычисляется интегрированием по переменной dl от 0 до $2\pi R$, где $r = \sqrt{X_C^2 + R^2}$:

$$\begin{aligned} \varphi_R^C &= \int d\varphi_R = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sigma dR}{\sqrt{X_C^2 + R^2}} \int_0^{2\pi R} dl = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sigma dR}{\sqrt{X_C^2 + R^2}} 2\pi R = \\ &= \frac{1}{2\epsilon_0} \sigma \frac{R dR}{\sqrt{X_C^2 + R^2}}. \end{aligned} \quad (4.44)$$

Так как тонкий диск можно условно разбить на тонкие concentрические кольца dR от R_1 до R_2 включительно, то выражение (4.44) необходимо ещё раз проинтегрировать уже по переменной R от R_1 до R_2 :

$$\varphi_{\sigma}^C = \frac{1}{2\varepsilon_0} \sigma \int_{R_1}^{R_2} \frac{R dR}{\sqrt{X_C^2 + R^2}}. \quad (4.45)$$

Примечание 4.10. Известно, что неопределённый интеграл типа (4.45) вычисляется следующим образом: $\int \frac{x dx}{\sqrt{a^2 + x^2}} = \sqrt{a^2 + x^2} + C$.

Таким образом, потенциал электростатического поля φ_{σ} в точке C , который создается тонким заряженным диском, после подстановки пределов интегрирования определяется формулой:

$$\varphi_{\sigma} = \frac{1}{2\varepsilon_0} \sigma \left(\sqrt{X_C^2 + R_2^2} - \sqrt{X_C^2 + R_1^2} \right).$$

Для нахождения потенциала поля φ_C в точке C , который создается тонким заряженным диском и заряженными стержнями A_1B_1 и A_2B_2 , необходимо найти алгебраическую сумму вычисленных выше потенциалов:

$$\varphi_C = \varphi_{A_1B_1} + \varphi_{A_2B_2} + \varphi_{\sigma}.$$

Значение координаты X_C сохраняем без изменения.

ПОРЯДОК ВЫБОРА ЧИСЛЕННЫХ ДАННЫХ И РИСУНКОВ К ЗАДАЧЕ 4 «ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ВАКУУМЕ»

Прежде чем приступить к решению задачи 4, самостоятельно составьте условие задачи согласно выбранному варианту и изобразите на координатной плоскости XOY сгенерированную систему заряженных тел.

Для этого необходимо:

1. Согласно Вашему порядковому номеру в списке группы или двум последним цифрам шифра (для студентов-заочников) из *таблицы 4.1* выбрать набор численных данных для системы заряженных тел, а также определить вид (сплошной или с круглым отверстием) тонкого диска и его схематическое расположение в пространстве, что показано на *рисунке 4.1*.

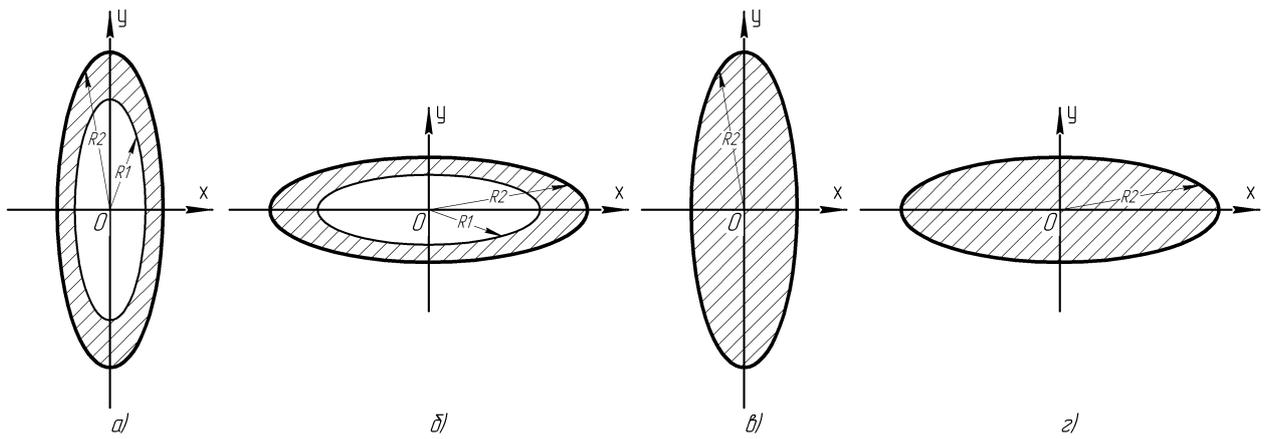
2. Последняя цифра Вашего порядкового номера или шифра будет являться номером варианта для выбора двух прямолинейных стержней A_1B_1 и A_2B_2 . Согласно Вашему варианту из *таблицы 4.2* выпишите их номера. На *рисунке 4.2* показано схематическое расположение прямолинейного стержня в координатной плоскости XOY .

3. Выпишите из *таблицы 4.3* координаты двух прямолинейных стержней A_1B_1 и A_2B_2 и укажите их на своём рисунке.

ЧИСЛЕННЫЕ ДАННЫЕ И РИСУНКИ К ЗАДАЧЕ 4 «ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ВАКУУМЕ»

Таблица 4.1 – численные данные для тонкого плоского диска (или тонкого плоского кольца), прямолинейных стержней и точечных зарядов.

N	Рис.	R ₁ , м	R ₂ , м	τ_1 , нКл/м	τ_2 , нКл/м	σ , нКл/м ²	q ₁ , нКл	q ₂ , нКл	q ₃ , нКл	q ₄ , нКл
1	а	0,1	0,6	6,7	8,9	6,5	-1,1	1,8	6,4	-6,7
2	в		0,2	2,6	8,1	5,4	0,5	-6,3	7,8	-3,6
3	б	0,2	0,5	4,4	8,5	7,9	1,5	-6,5	-2,5	-1
4	г		0,4	3,2	6,9	5,1	0,4	-4,8	-3,2	-6,3
5	а	0,3	0,9	2,3	2,3	5,7	3,4	-4,2	-2,1	4,2
6	в		0,2	7	3,5	3,1	7,2	-4,9	5,7	-7,2
7	б	0,4	0,8	6,8	8,7	3,5	1,3	2,5	6,5	1,1
8	г		0,7	7	7	5,1	5	2,8	3	-2,8
9	а	0,1	0,2	1,7	9	3,3	1,8	-8,9	-8	-2,5
10	в		0,3	2,1	4,6	5,7	8,8	5	-8,6	-7,5
11	б	0,2	0,9	2,7	4,3	4,4	-4,9	-3,5	0,8	-0,9
12	г		0,9	4	7,1	4,2	7	6,5	3,9	4,4
13	а	0,3	0,4	4,4	2,4	5,5	1,6	-1,1	-0,1	-5,6
14	в		0,9	4,8	8,6	3,4	-0,1	-0,3	-3	5,3
15	б	0,4	0,9	1,2	7,7	5,8	-6,8	8,5	2,9	6,2
16	г		0,7	7,4	5,7	0,7	0,9	-7,1	1,3	2,4
17	а	0,1	0,3	0,8	4,2	8,8	4	8,6	-2,2	-0,2
18	в		0,3	4,4	6	3	-6	6,4	-4,4	1,5
19	б	0,2	0,4	4,6	3,7	5,2	1,4	-1,7	-0,4	3,9
20	г		0,4	1,5	2,8	5,3	2,1	7,2	-0,4	-1,3
21	а	0,3	0,5	7,5	1,9	2,9	1,1	-3,5	-4,6	-2,1
22	в		0,9	1,3	6,8	8,8	-0,4	7,1	5,1	-1
23	б	0,4	0,8	8,8	6,2	3,8	-4	4	3,7	-0,8
24	г		0,5	2,3	1,5	2,1	-3,7	5,9	4,4	-1,3
25	а	0,1	0,2	5	1,6	6,7	-5,7	-4,4	-0,7	-5
26	в		0,37	9	3,7	3,6	2,1	4,7	1,6	-8,2
27	б	0,2	0,5	3,7	1,4	8,7	6,3	-4,7	0,7	-2,5
28	г		0,4	5,2	8,5	4,9	1,6	-6	3	-4,1
29	а	0,3	0,6	4,4	5,1	8,1	-0,6	4,8	7,5	6,3
30	в		0,8	6,4	5,9	8,8	5,4	5,4	-7,9	-7,4



*а, б – диск с круглым отверстием;
в, г – сплошной диск*

Рисунок 4.1 – вид и схематическое расположение тонкого диска в плоскости рисунка, перпендикулярной оси OX (а, в) или оси OY (б, г)

Таблица 4.2 – Наборы прямолинейных стержней

Номер стержня	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A_1B_1	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1
A_2B_2	5	6	9	7	8	6	9	10	8	9

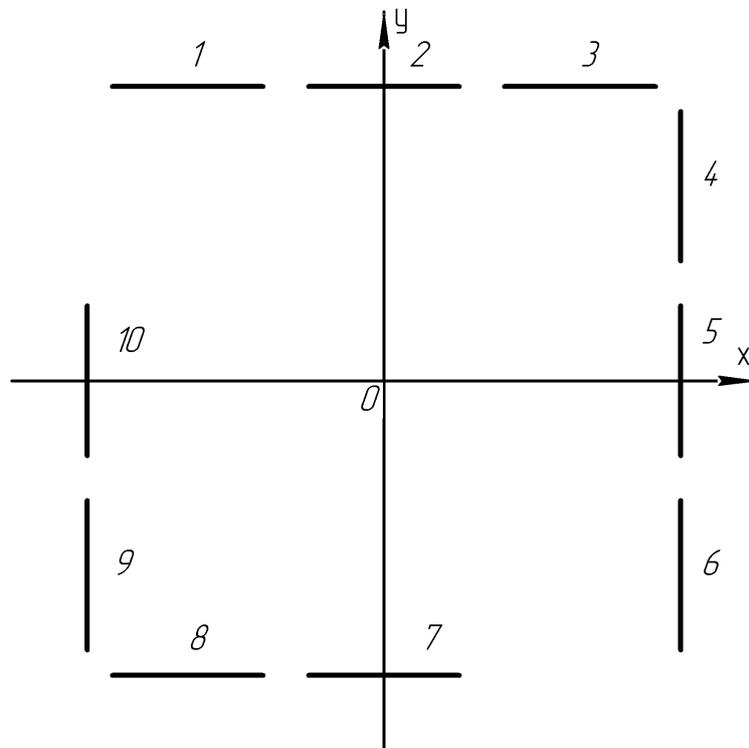


Рисунок 4.2 – схематическое расположение в координатной плоскости прямолинейных заряженных стержней AB

Таблица 4.2 – координаты прямолинейного стержня *AB*

№	Номер стержня и координаты точек А (x; y), В (x; y)				
	1	2	3	4	5
1	(-0,7; 0,4), (0; 0,4)	(-0,3; 0,3), (0,2; 0,3)	(0,3; 0,2), (0,8; 0,2)	(1; 0,3), (1; 0,7)	(0,2; 0,4), (0,2; -0,2)
2	(-1; 0,9), (-0,1; 0,9)	(-0,1; 0,8), (0,1; 0,8)	(0,2; 0,8), (1; 0,8)	(1; 0,2), (1; 0,8)	(1; 0,4), (1; -0,3)
3	(-0,8; 0,3), (0; 0,3)	(-0,2; 0,1), (0,1; 0,1)	(0,3; 0,1), (1; 0,1)	(0,9; 0,1), (0,9; 0,7)	(0,5; 0,2), (0,5; -0,3)
4	(-0,9; 0,4), (-0,3; 0,4)	(-0,4; 0,9), (0,3; 0,9)	(0,3; 0,9), (0,8; 0,9)	(0,2; 0,3), (0,2; 0,8)	(0,9; 0,1), (0,9; -0,1)
5	(-0,8; 0,9), (-0,3; 0,9)	(-0,1; 0,7), (0,1; 0,7)	(0,3; 0,3), (0,9; 0,3)	(0,5; 0,3), (0,5; 0,6)	(0,6; 0,4), (0,6; -0,4)
6	(-0,9; 0,1), (-0,4; 0,1)	(-0,4; 0,9), (0,4; 0,9)	(0,3; 0,5), (0,9; 0,5)	(0,8; 0,3), (0,8; 0,7)	(0,8; 0,1), (0,8; 0)
7	(-0,8; 0,7), (-0,2; 0,7)	(-0,4; 0,1), (0,1; 0,1)	(0,2; 0,9), (0,6; 0,9)	(0,8; 0), (0,8; 0,9)	(0,3; 0,1), (0,3; -0,4)
8	(-1; 0,9), (-0,2; 0,9)	(-0,1; 0,9), (0,4; 0,9)	(0; 0,5), (0,7; 0,5)	(0,8; 0,1), (0,8; 0,9)	(0,6; 0,1), (0,6; 0)
9	(-0,6; 0,6), (-0,1; 0,6)	(-0,4; 0,6), (0,3; 0,6)	(0,1; 0,7), (0,8; 0,7)	(0,4; 0,4), (0,4; 0,8)	(0,8; 0,1), (0,8; -0,1)
0	(-0,9; 0,6), (-0,1; 0,6)	(-0,2; 0,2), (0,3; 0,2)	(0,3; 0,4), (1; 0,4)	(0,7; 0,3), (0,7; 0,7)	(0,6; 0,3), (0,6; 0)
	Номер стержня и координаты точек А (x; y), В (x; y)				
	6	7	8	9	10
1	(0,1; -0,3), (0,1; -0,9)	(-0,3; -0,9), (0,3; -0,9)	(-0,7; -0,3), (0; -0,3)	(-0,4; 0), (-0,4; -0,8)	(-0,8; 0,1), (-0,8; -0,1)
2	(0,6; -0,4), (0,6; -1)	(-0,4; -0,2), (0; -0,2)	(-0,8; -0,4), (-0,1; -0,4)	(-1; -0,2), (-1; -0,9)	(-0,4; 0), (-0,4; -0,4)
3	(0,5; -0,3), (0,5; -1)	(-0,4; -0,9), (0,2; -0,9)	(-0,9; -0,8), (-0,1; -0,8)	(-0,1; 0), (-0,1; -0,9)	(-0,2; 0,3), (-0,2; -0,2)
4	(0,4; -0,2), (0,4; -0,8)	(-0,4; -0,2), (0,2; -0,2)	(-0,8; -0,3), (-0,3; -0,3)	(-0,3; -0,2), (-0,3; -0,9)	(-0,8; 0,1), (-0,8; -0,4)
5	(0,7; -0,2), (0,7; -0,8)	(-0,1; -0,2), (0,4; -0,2)	(-0,8; -0,7), (-0,1; -0,7)	(-0,8; 0), (-0,8; -0,9)	(-0,3; 0,3), (-0,3; -0,2)
6	(0,8; -0,2), (0,8; -0,7)	(0; -0,4), (0,1; -0,4)	(-0,6; -0,5), (-0,2; -0,5)	(-0,5; -0,2), (-0,5; -0,8)	(-0,7; 0,3), (-0,7; -0,3)
7	(0,9; -0,3), (0,9; -0,9)	(0; -0,5), (0,1; -0,5)	(-0,9; -0,9), (0; -0,9)	(-0,5; -0,3), (-0,5; -0,6)	(-0,6; 0), (-0,6; -0,1)
8	(0,7; 0), (0,7; -0,7)	(-0,2; -0,8), (0,1; -0,8)	(-0,8; -0,6), (-0,3; -0,6)	(-0,1; -0,4), (-0,1; -0,9)	(-0,2; 0,2), (-0,2; -0,2)
9	(0,7; -0,2), (0,7; -0,6)	(-0,3; -0,4), (0; -0,4)	(-1; -0,1), (0; -0,1)	(-1; 0), (-1; -0,7)	(-0,1; 0,2), (-0,1; -0,1)
0	(0,5; -0,4), (0,5; -0,9)	(-0,2; -0,2), (0,3; -0,2)	(-0,8; -0,5), (-0,3; -0,5)	(-0,9; -0,3), (-0,9; -0,7)	(-1; 0,3), (-1; -0,2)

ЗАДАЧА 5. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Условие: На *рисунке 5.0* изображена простая электрическая цепь постоянного тока с источниками ЭДС и резисторами. Между точками *a* и *b* может быть подключено эквивалентное внешнее сопротивление, а между точками *c* и *d* могут быть включены конденсаторы различной конфигурации. Выполните следующие задания.

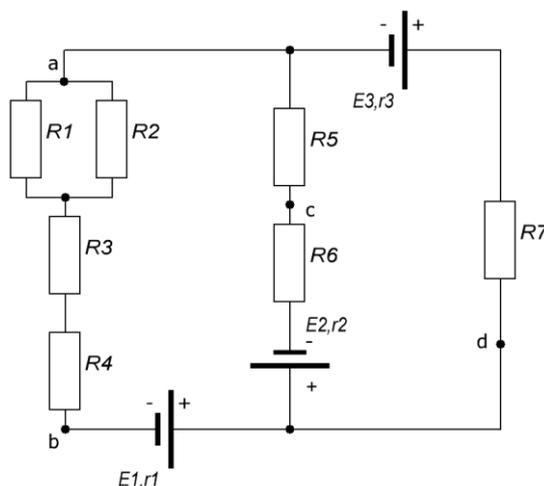


Рисунок 5.0 – схема электрической цепи

Задание 1: Выбрав свой вариант рисунка электрической схемы (см. рисунки в конце решения примера задачи) и численные данные из таблицы согласно своему варианту, вычислите эквивалентное сопротивление R_{ab} между точками *a* и *b* Вашего варианта электрической схемы.

Решение: В качестве примера для решения используем *рисунк 5.0*. Для упрощения электрической схемы рекомендуется вычислить общее сопротивление между точками *a* и *b*, обозначив его как R_{ab} .

Примечание 5.1. При *последовательном* соединении сопротивления проводников складываются, т. е. $R_{\text{общ}} = R_1 + R_2 + \dots$. При *параллельном* же соединении складываются обратные величины сопротивлений проводников, то есть $\frac{1}{R_{\text{общ}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$. Смешанное соединение – это сочетание последовательного и параллельного соединений.

В нашем примере (*рисунк 5.0*) нетрудно видеть, что сопротивления R_1 и R_2 соединены параллельно, а сопротивления R_3 и R_4 соединены последовательно, но общее сопротивление между точками *a* и *b* будет вычисляться как последовательное соединение предварительно найденных сопротивлений R_{12} и R_{34} .

То есть $\frac{1}{R_{12}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ (параллельное соединение) или $R_{12} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$; соответственно $R_{34} = R_3 + R_4$ (последовательное соединение). Тогда $R_{ab} = R_{12} + R_{34}$,

так как эти два участка электрической цепи соединены последовательно. В Вашем варианте, естественно, порядок вычислений будет несколько отличаться, но принцип вычисления сохраняется.

Примечание 5.2. При вычислении $R_{экв}$ или R_{ab} необходимо вначале провести промежуточные вычисления, а потом окончательное, действуя по принципу последовательного упрощения рассматриваемого участка электрической цепи.

Ответ необходимо округлить до точности исходных данных и записать в *Ом*.

Задание 2. Нарисовав эквивалентную электрическую схему замещения с R_{ab} (рисунок 5.0 а) и обозначив произвольным образом направления электрических токов на всех участках цепи, запишите на основании **правил Кирхгофа** уравнения и, решая их совместно вычислите электрические токи на всех участках электрической цепи.

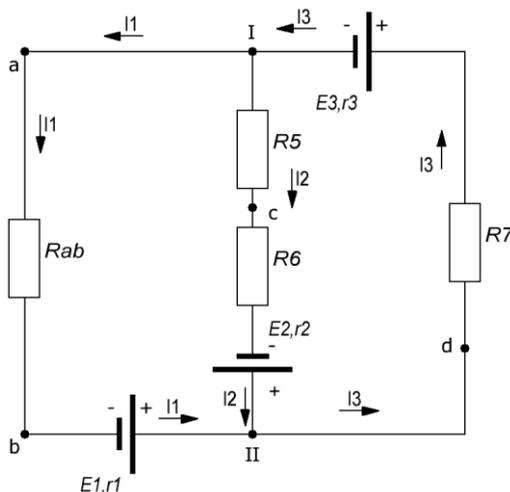


Рисунок 5.0 а – схема электрической цепи с эквивалентным сопротивлением R_{ab}

Решение.

Примечание 5.3. Так как под электрическим током понимают направленное движение положительных электрических зарядов в проводниках, то, выбирая на каждом участке цепи направления токов, надо придерживаться простого правила: все токи не могут сходиться в узле электрической схемы (узел – это точка в электрической цепи, в которой сходятся три и более проводников), как и расходиться. Также надо помнить, что между узлами на участке цепи с последовательно включёнными элементами величина электрического тока, как и его направление, не изменяется, т.е. токи свои направления и величины изменяют только после узла.

Узлами на *рисунке 5.0 а* являются точки **I** и **II**. Так как токи изменяются только после узла, а в узлах сходятся только три участка электрической цепи, то в нашем случае в электрической цепи будут иметь место три различных тока: I_1 , I_2 и I_3 .

Примечание 5.4. Первое правило Кирхгофа (первое правило Кирхгофа сформулировано на основании общезначимого закона сохранения энергии, т. е. в узле не могут накапливаться заряды какого-либо знака, т. к. это равноценно появлению нового источника ЭДС): алгебраическая сумма (с учетом знака) электрических токов в узле электрической схемы равна нулю, т. е.

$$\sum_i I_i = 0$$

Правило знаков: если ток направлен к узлу ему приписывают знак “+”, если от узла, то знак “-”.

Тогда на основании **первого правила Кирхгофа** для нашей схемы (*рисунок 5.0 а*) запишем:

$$\text{узел I: } -I_1 - I_2 + I_3 = 0;$$

$$\text{узел II: } +I_1 + I_2 - I_3 = 0.$$

Нетрудно заметить, что уравнения здесь для узлов отличаются только знаком, т. е. не являются независимыми. Другими словами, если в электрической схеме имеется N узлов, то мы можем записать только $(N-1)$ независимое уравнение. Для нашего случая на основании первого правила Кирхгофа мы можем оставить только одно независимое уравнение (разницы нет для какого узла):

$$-I_1 - I_2 + I_3 = 0. \tag{5.1}$$

Примечание 5.5. Второе правило Кирхгофа (второе правило Кирхгофа сформулировано на основании закона Ома для замкнутого контура электрической цепи): в выбранном замкнутом электрическом контуре алгебраическая сумма (с учетом знака) падений напряжений равняется алгебраической сумме ЭДС, встречающихся в этом контуре, т. е.

$$\sum_{i,j} I_i \cdot R_j = \sum_i E_i$$

Правило знаков: при выборе направления обхода замкнутого контура, как правило, по часовой стрелке, необходимо учитывать для падений напряжений совпадение (знак “+”) или несовпадение (знак “-”) направления обхода и направления тока на данном участке цепи; учет знака ЭДС следующий: если при выбранном обходе контура проходит ЭДС от “-” к “+”, то в уравнении ставите знак “+”, если наоборот, то знак “-”.

На схеме (рисунки 5.0 а) нетрудно выбрать три контура обхода: внешний и два внутренних, но независимым электрическим замкнутым контуром является только тот, который содержит хотя бы один элемент электрической цепи, который не вошел в другие выбранные контуры. В нашем случае таких независимых контуров будет два, а третий будет состоять из элементов, вошедших в два первых контура, т. е. N контуров в схеме, поэтому мы можем записать только $(N-1)$ независимое уравнение.

Выберем в качестве первого контура внешний контур (рисунки 5.0 а), содержащий сопротивление R_{ab} и R_7 , а также ЭДС E_1 и E_3 (r_1 и r_3 – внутренние сопротивления ЭДС, на которых при записи уравнений также необходимо учитывать падение напряжения, создаваемое внешним током).

Тогда на основании **второго правила Кирхгофа** и с учётом правил знаков для первого контура запишем:

$$-I_1 R_{ab} - I_3 r_3 - I_3 R_7 - I_1 r_1 = -E_1 + E_3. \quad (5.2)$$

За второй независимый контур выберем левый контур с сопротивлениями R_{ab} , R_5 и R_6 , а также с ЭДС E_1 и E_2 (r_1 и r_2 – внутренние сопротивления ЭДС).

Тогда на основании второго правила Кирхгофа и правил знаков запишем:

$$-I_1 R_{ab} + I_2 R_5 + I_2 R_6 + I_2 r_2 - I_1 r_1 = -E_1 + E_2. \quad (5.3)$$

Аналогично можно записать уравнение и для 3-го контура, но все элементы электрической цепи уже вошли в предыдущие уравнения, поэтому данное уравнение не будет здесь являться независимым.

Так как в решаемой задаче всего три неизвестных I_1 , I_2 и I_3 и уравнений также три, тогда система линейных уравнений (5.1–5.3) будет иметь однозначное решение:

$$\begin{cases} -I_1 - I_2 + I_3 = 0 \\ -I_1 R_{ab} - I_3 r_3 - I_3 R_7 - I_1 r_1 = -E_1 + E_3 \\ -I_1 R_{ab} + I_2 R_5 + I_2 R_6 + I_2 r_2 - I_1 r_1 = -E_1 + E_2. \end{cases} \quad (5.4)$$

Примечание 5.6. Для упрощения решения системы трёх линейных уравнений с тремя неизвестными рекомендуется вначале подставить известные численные значения сопротивлений, внутренних сопротивлений и ЭДС и, упростив уравнения, решить их доступным для Вас способом: или через определитель системы линейных уравнений и алгебраические дополнения, или методом последовательного исключения неизвестных.

Примечание 5.7. Заметим, что в случае отрицательного значения силы тока, его направление на электрической схеме (рисунки 5.0 а) следует поменять на противоположное (можно показать пунктиром). Численные значения токов следует также округлять до точности исходных данных.

Задание 3. Найдите падение напряжения на зажимах любого источника ЭДС Вашей электрической схемы (по Вашему выбору).

Решение.

Примечание 5.8. С этой целью следует воспользоваться математической записью (формулой) закона Ома для участка цепи, содержащей ЭДС: $I = \frac{E-U}{r}$, где E – ЭДС источника, r – его внутреннее сопротивление, а U – искомого падение напряжения.

Следует при этом отметить практическую цель данного простого задания: при измерении ЭДС (аккумулятор, батарейка и т. д.) в замкнутой цепи её значение будет меньше на падение напряжения на внутреннем сопротивлении самого источника.

Задание 4. Проверьте выполнение баланса мощностей в Вашей электрической схеме (рисунок 5.0 а).

Решение.

Примечание 5.9. Мощность – это работа, выполняемая в единицу времени или быстрота выполнения работы. Источники ЭДС для поддержания постоянной разности потенциалов в электрической цепи выполняют работу за счет сторонних (неэлектрических) сил по разделению зарядов, т. е. $E = \frac{dA}{dq}$. Так как сила тока $I = \frac{dq}{dt}$, то $dq = I \cdot dt$. Значит, мощность источника тока $N = \frac{dA}{dt} = E \cdot I$.

Для вычисления общей мощности источников тока в электрической цепи необходимо все мощности суммировать с учетом включения их в электрическую цепь. Т. е., если внешний ток, протекающий через источник тока, и внутренний ток, создаваемый собственно источником ЭДС, совпадают, то вычисляемая мощность берется со знаком “+”, если же не совпадают, то со знаком “-” (см. рисунок 5.0 б):

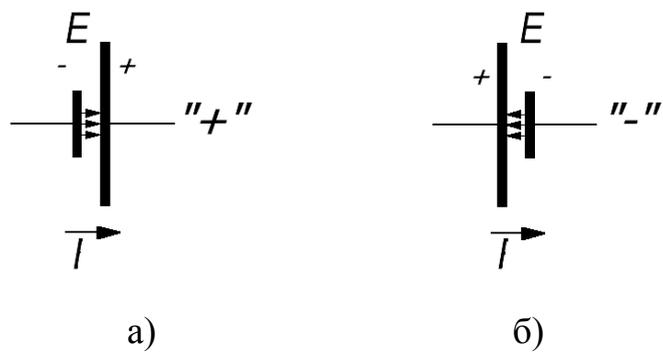


Рисунок 5.0 б – к определению знака мощности источника тока

Напомним, что за направление тока принято направленное движение положительных зарядов.

Примечание 5.10. Работа электрического тока во внешней цепи вычисляется согласно закону Джоуля-Ленца. При этом учитывается выделение тепла на всех сопротивлениях: внешних и внутренних. Так как $dQ = I^2 R dt$, то мощность $N = \frac{dQ}{dt} = I^2 R$.

Здесь сила тока возводится в квадрат, то при вычислении выделяемой мощности во всей цепи направления токов не имеют значения, т. е. все мощности необходимо просто суммировать.

Заметим также, что в системе SI мощность измеряется в **Вт**, и баланс мощностей подразумевает их примерное равенство: $\delta = \frac{|P_{\text{ист}} - P_{\text{потр}}|}{P_{\text{ист}}} \cdot 100\% \leq 2\%$. Если это условие не выполняется, необходимо вернуться к решению задачи.

При решении задачи все вычисления проводятся в системе SI и округляются до точности исходных данных.

Задание 5. Между указанными в *таблице 5.2* точками электрической схемы, согласно выбранному Вами варианту, включены последовательно два конденсатора, типы которых также указаны в таблице. Плоский конденсатор имеет квадратные пластины с длиной стороны l_1 и расстоянием между ними l_2 ; сферический конденсатор имеет внутренний радиус l_1 и разность радиусов l_2 ; цилиндрический конденсатор имеет внутренний радиус l_1 , разность радиусов l_2 и длину $20 \cdot l_1$. Конденсаторы полностью заполнены слоем однородного диэлектрика с диэлектрическими проницаемостями ϵ_1 и ϵ_2 соответственно. Найти электрический заряд на той обкладке конденсатора, которая присоединена к первой из указанных точек.

Решение.

Например, если конденсаторы присоединены к точкам cd , то это будет обозначать, что обкладка конденсатора C_1 присоединена к точке c .

Примечание 5.11. Конденсатор представляет собой два проводника определенной формы (плоскость, сфера, цилиндр и т. д.), разделенных диэлектриком. Конденсатор служит для накопления на проводящих пластинах или обкладках электрических зарядов, а вместе с ними энергии электрического поля, сосредоточенного между обкладками конденсатора. При появлении заряда на любой из обкладок, на другой появляется заряд равной величины, но противоположного знака.

Каждый конденсатор характеризуется электрической ёмкостью C (в системе SI – это фарада [Φ]) и максимальной разностью потенциалов, которую можно подать на обкладки конденсатора.

Под электроёмкостью конденсатора C понимают заряд q , который необходимо сообщить одной из обкладок, чтобы разность потенциалов между обкладками изменилась на 1 В , т. е.

$$C = \frac{q}{U}. \quad (5.5)$$

Поэтому в системе SI $1\text{ Ф} = 1 \frac{\text{Кл}}{\text{В}}$.

Так как 1 Ф – это большая электроёмкость, то практически используют мФ (10^{-3}), мкФ (10^{-6}) и пФ (10^{-12}).

Примечание 5.12. Формула для вычисления электроёмкости конденсатора зависит от формы обкладок конденсатора:

а) плоский конденсатор:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}, \quad (5.6)$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ – электрическая постоянная, ε – диэлектрическая проницаемость, которая определяется типом диэлектрика, S – площадь одной из пластин конденсатора, d – расстояние между пластинами;

б) сферический конденсатор:

$$C = \frac{4 \pi \varepsilon_0 \varepsilon}{\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)}, \quad (5.7)$$

где R_1 – внутренний радиус для меньшей сферы, R_2 – внешний радиус для большей сферы;

в) цилиндрический конденсатор:

$$C = \frac{2 \pi \varepsilon_0 \varepsilon}{\ln \frac{b}{a}} \cdot l, \quad (5.8)$$

где a – радиус внутреннего (меньшего) цилиндра, b – радиус внешнего (большего) цилиндра, l – длина цилиндров.

Примечание 5.13. При соединении нескольких конденсаторов в батарею общая электроёмкость изменяется. Для увеличения общей электроёмкости конденсаторы соединяют **параллельно**, тогда

$$C_{\text{общ}} = C_1 + C_2 + \dots \quad (5.9)$$

При параллельном соединении конденсаторов разность потенциалов на каждом конденсаторе сохраняется постоянной, т. е. $U = const$.

Для предотвращения электрического пробоя конденсаторы соединяют **последовательно**, тогда суммируются обратные величины ёмкостей

$$\frac{1}{C_{\text{общ}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots \quad (5.10)$$

При последовательном соединении конденсаторов заряд на пластинах каждого конденсатора одинаков, т. е. $q = const$.

Практически в электрических цепях используют комбинированные схемы соединения конденсаторов.

Для выполнения задания 5 вернёмся к электрической схеме (см. рисунок 5.0а) и к точкам c и d подсоединим последовательно два конденсатора согласно Вашему варианту. Например, C_1 – сферический конденсатор, C_2 – цилиндрический конденсатор.

Вспомним, что называется ёмкостью (5.5)

$$C_{\text{общ}} = \frac{q_c}{U_{cd}},$$

где $C_{\text{общ}}$ – общая ёмкость двух последовательно соединённых конденсаторов C_1 и C_2 , q_c – заряд на обкладке конденсатора, подсоединённого к точке c , U_{cd} – разность потенциалов между точками c и d .

Так как конденсаторы C_1 и C_2 соединены последовательно, то согласно (5.10):

$$\frac{1}{C_{\text{общ}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2},$$

откуда выражаем $C_{\text{общ}}$.

Для того, чтобы вычислить $C_{\text{общ}}$, необходимо вначале вычислить ёмкости конденсаторов C_1 и C_2 , используя формулы (5.6 – 5.8) в зависимости от типа конденсатора (см. свой вариант).

Далее выбираем участок электрической цепи (см. рисунок 5.0 а), который содержит ЭДС. Например, точка $c \rightarrow$ сопротивление $R_5 \rightarrow$ источник $E_3 \rightarrow$ сопротивление $R_7 \rightarrow$ точка d . Запишем для выбранного участка цепи, содержащего ЭДС закон Ома:

$$I = \frac{E - U}{R}, \quad (5.11)$$

где I – сила тока на участке цепи, E – ЭДС на участке цепи, U – разность потенциалов на участке цепи, R – сопротивление участка цепи.

Так как выбранный участок цепи содержит два тока I_2 и I_3 и может содержать несколько ЭДС, то формулу (5.11) перепишем для общего случая, т. е.:

$$\sum I = \frac{\sum E - U}{\sum(R + r)}. \quad (5.12)$$

Заметим, что Σ – это алгебраическая сумма с учётом знака, который зависит от направления обхода выбранного участка цепи. На примере электрической схемы (рисунок 5.0 а – обход от точки c к точке d по часовой стрелке) запишем:

$$\begin{aligned} \sum I(R + r) &= \sum E - U_{cd}, \\ \text{где } \sum I(R + r) &= -I_2R_5 - I_3r_3 - I_3R_7, \\ \sum E &= E_3, \\ U_{cd} &= \varphi_c - \varphi_d. \end{aligned}$$

Тогда

$$-I_2R_5 - I_3r_3 - I_3R_7 = E_3 - (\varphi_c - \varphi_d),$$

откуда

$$\varphi_c - \varphi_d = E_3 + I_2R_5 + I_3r_3 + I_3R_7.$$

Окончательно:

$$q_c = C_{\text{общ}} \cdot (\varphi_c - \varphi_d).$$

Так как заряд в 1 Кл – это большой заряд, то запишите ответ в $\mathbf{нКл}$.

ЧИСЛЕННЫЕ ДАННЫЕ К ЗАДАЧЕ 5 «ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК»

(вариант численных данных таблиц 5.1 и 5.2 выбирается по последней цифре Вашего порядкового номера в списке группы или шифра)

Таблица 5.1 – численные данные источников токов и резисторов, входящих в электрическую цепь

	$E_1,$ В	$E_2,$ В	$E_3,$ В	$r_1,$ Ом	$r_2,$ Ом	$r_3,$ Ом	$R_1,$ Ом	$R_2,$ Ом	$R_3,$ Ом	$R_4,$ Ом	$R_5,$ Ом	$R_6,$ Ом	$R_7,$ Ом
0	2	4	6	1	1	2	120	210	320	640	100	500	700
1	4	10	12	2	3	1	1400	2900	5100	1700	6800	1300	5500
2	6	7	3	2	2	2	3200	4700	5600	8200	1000	2400	5000
3	8	12	5	1	1	3	620	470	1000	1200	750	900	1350
4	10	2	7	4	2	2	240	150	760	430	900	570	800
5	12	18	9	2	3	5	370	600	790	590	300	340	600
6	14	16	11	4	2	1	540	860	320	350	1000	230	700
7	16	12	13	1	3	5	890	360	790	250	500	650	100
8	18	8	15	4	1	3	1000	3700	960	2440	3400	2220	3000
9	20	4	17	2	3	1	3000	4000	5000	6000	7000	3000	8000

Таблица 5.2 – типы и параметры конденсаторов, а также место их подключения в электрическую цепь

Вариант	Точки соединения	Типы конденсаторов	l_1 , см	l_2 , см	ϵ_1	ϵ_2
0	de	плоский, сферический	1,0	0,5	2,0	3,0
1	cb	сферический, цилиндрический	2,0	0,1	3,0	4,0
2	cd	цилиндрический, плоский	1,0	0,2	2,5	6,0
3	bd	плоский, цилиндрический	0,5	0,5	3,5	8,0
4	ad	сферический, цилиндрический	1,5	0,2	4,0	10,0
5	ca	цилиндрический, плоский	2,5	0,3	4,5	14,0
6	ed	плоский, сферический	2,0	0,3	5,0	6,0
7	ae	сферический, цилиндрический	3,0	0,2	5,5	2,0
8	de	цилиндрический, плоский	3,0	0,1	6,0	3,0
9	cd	плоский, сферический	1,0	0,2	7,0	4,0

РИСУНКИ СХЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ К ЗАДАЧЕ 5 «ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК»

(номер рисунка совпадает с Вашим порядковым номером в списке группы или двумя последними цифрами шифра)

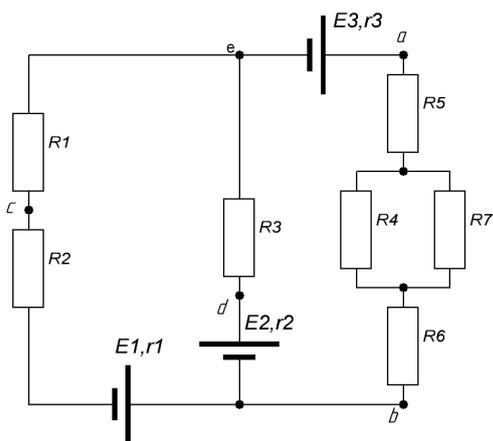


Рисунок 5.1

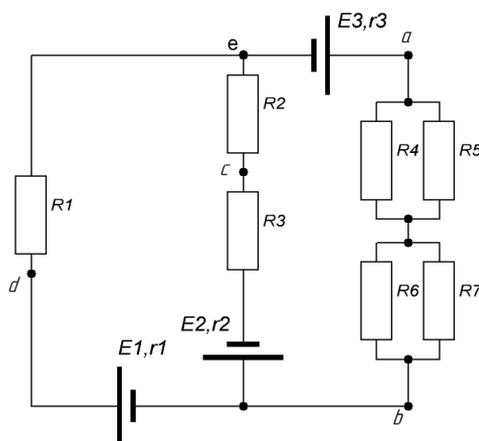


Рисунок 5.2

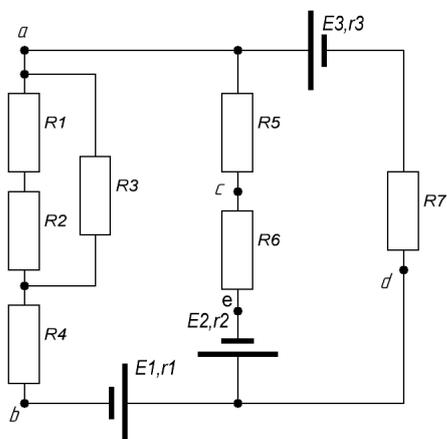


Рисунок 5.3

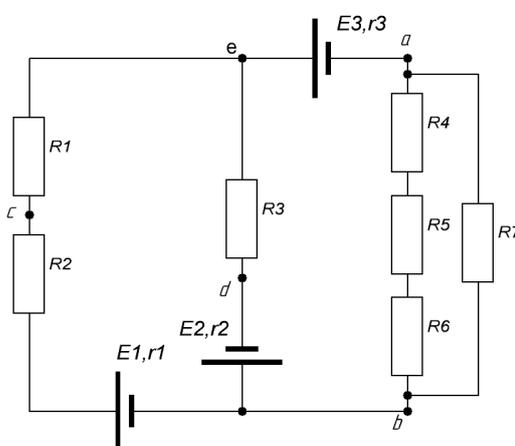


Рисунок 5.4

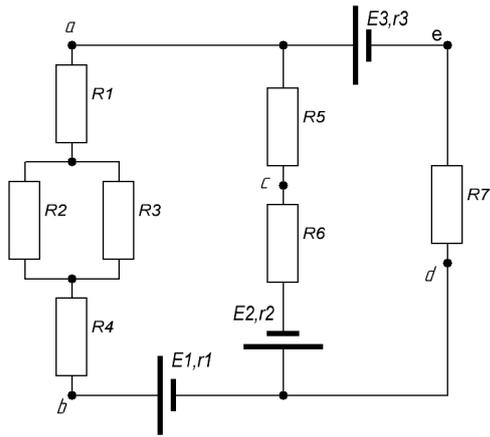


Рисунок 5.5

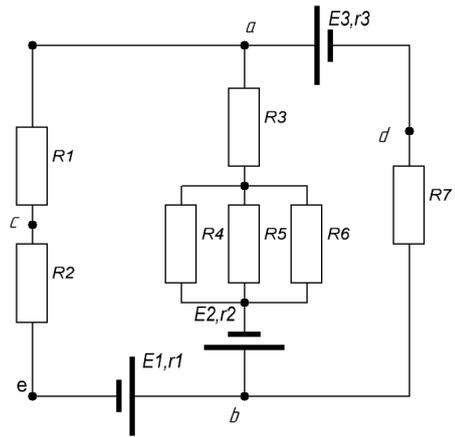


Рисунок 5.6

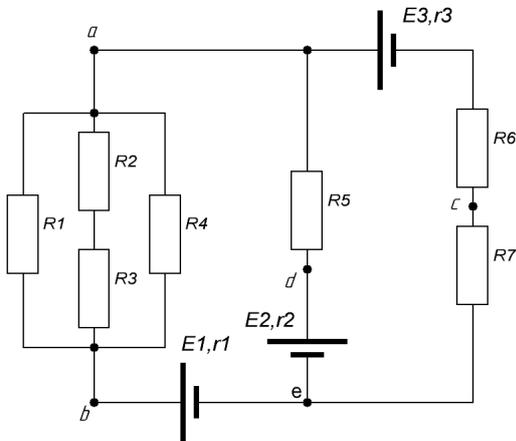


Рисунок 5.7

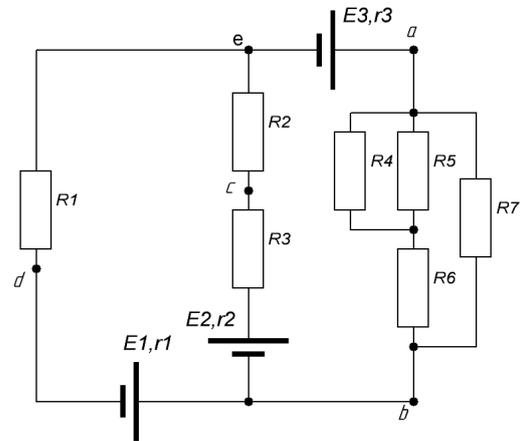


Рисунок 5.8

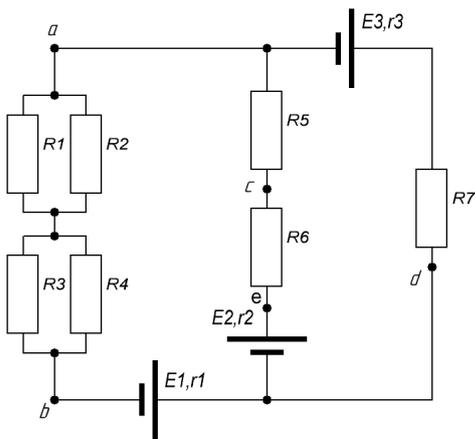


Рисунок 5.9

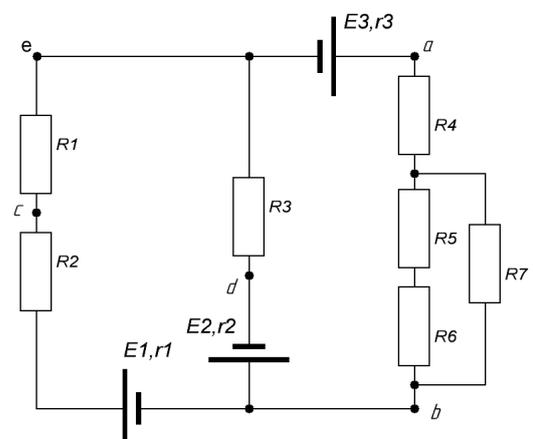


Рисунок 5.10

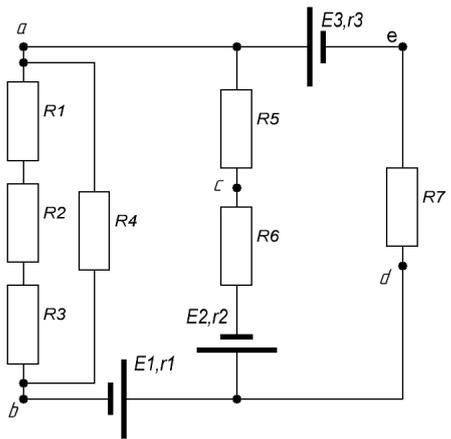


Рисунок 5.11

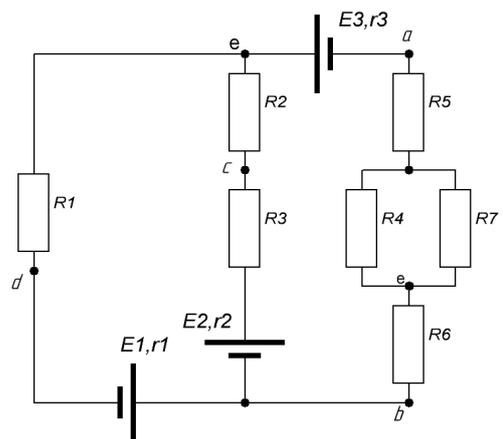


Рисунок 5.12

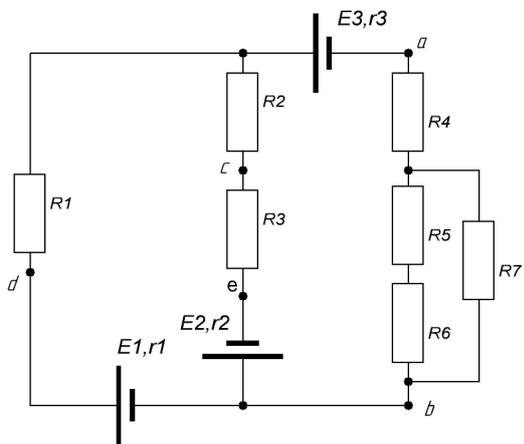


Рисунок 5.13

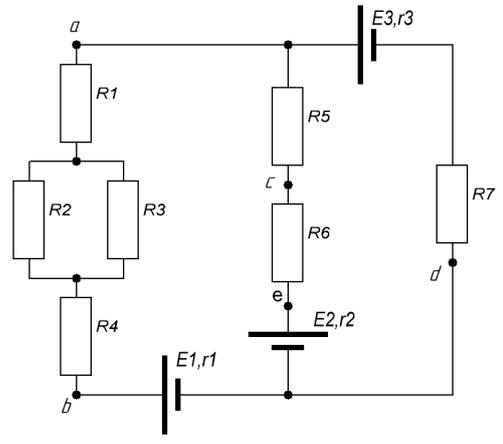


Рисунок 5.14

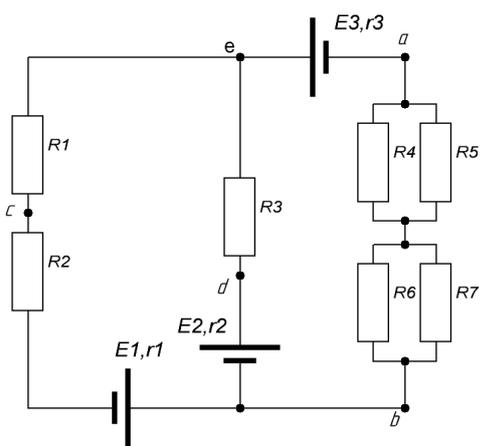


Рисунок 5.15

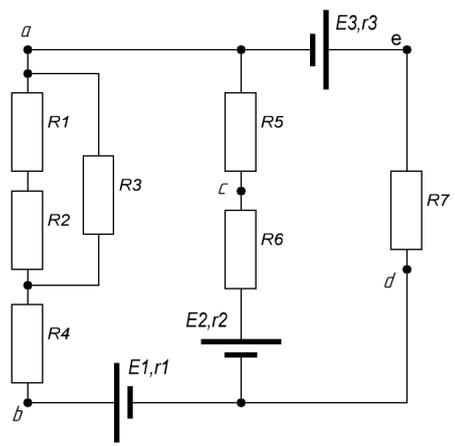


Рисунок 5.16

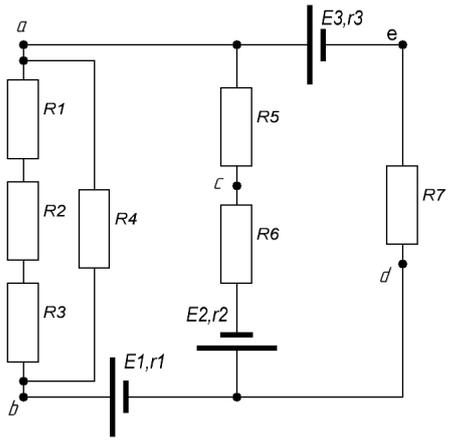


Рисунок 5.17

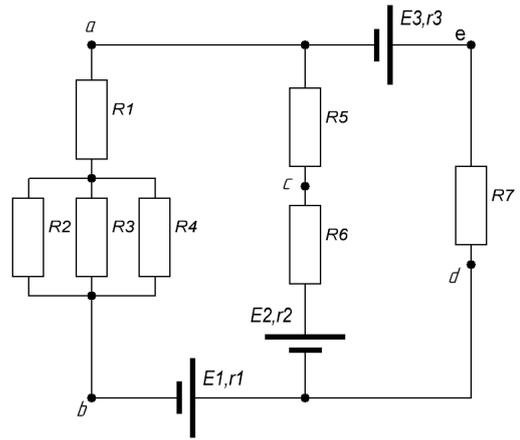


Рисунок 5.18

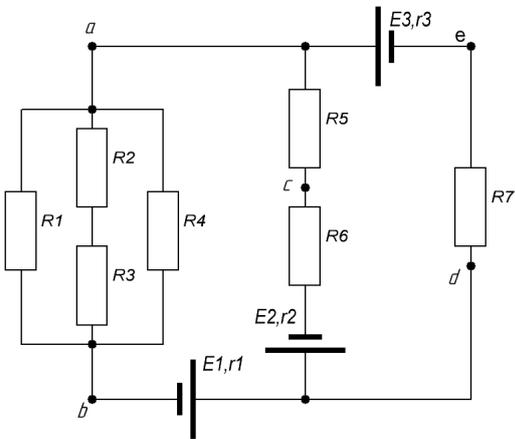


Рисунок 5.19

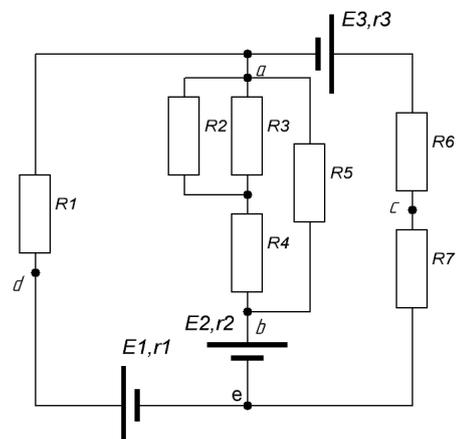


Рисунок 5.20

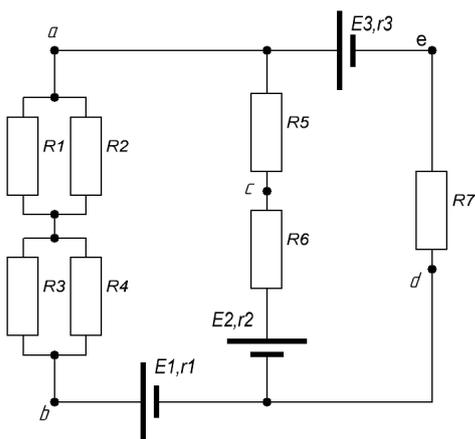


Рисунок 5.21

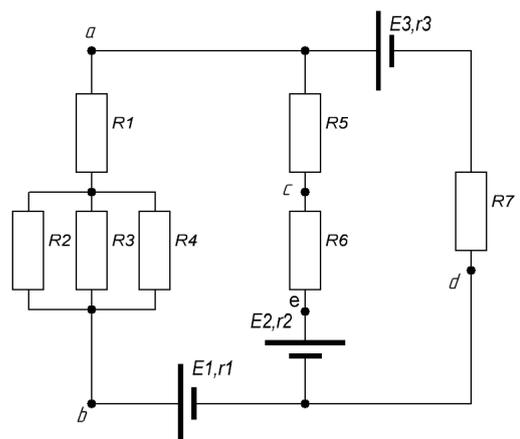


Рисунок 5.22

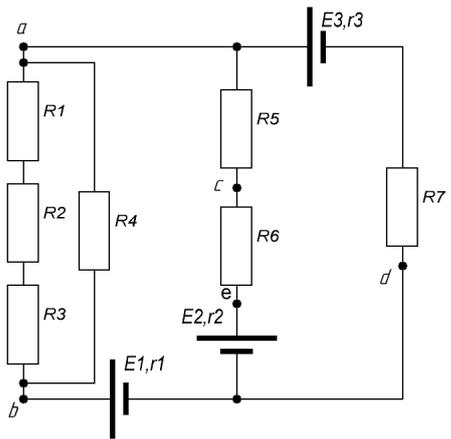


Рисунок 5.23

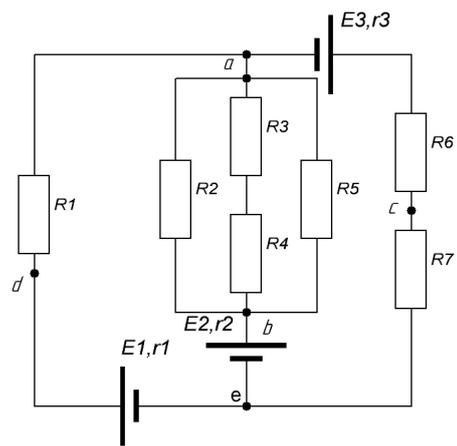


Рисунок 5.24

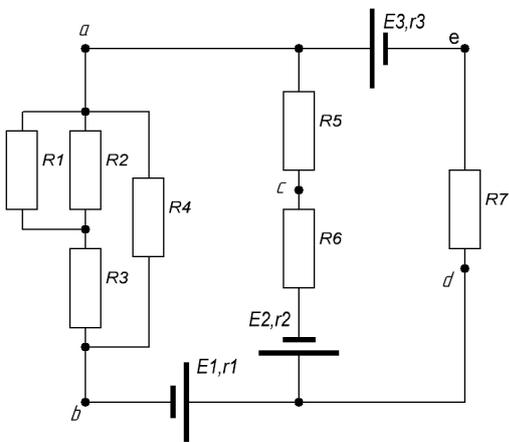


Рисунок 5.25

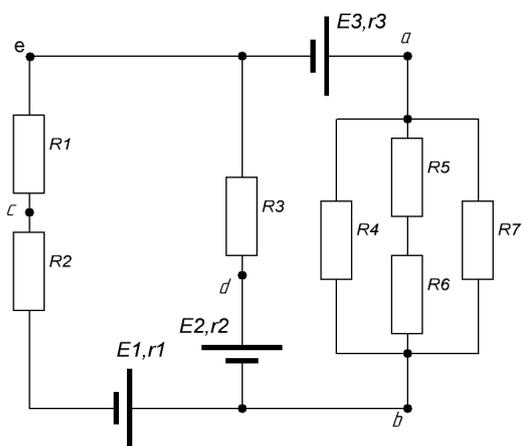


Рисунок 5.26

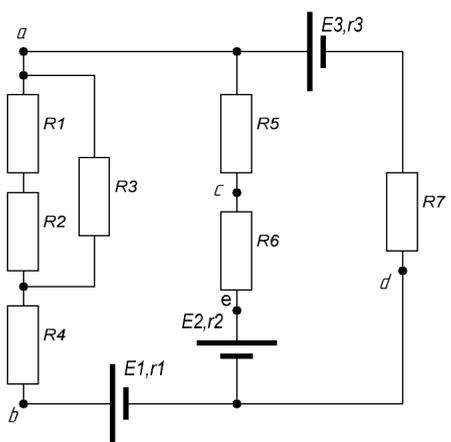


Рисунок 5.27

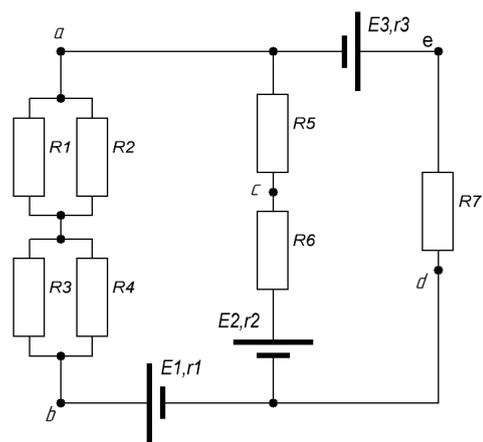


Рисунок 5.28

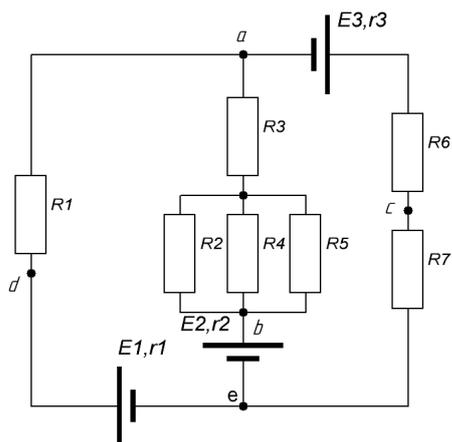


Рисунок 5.29

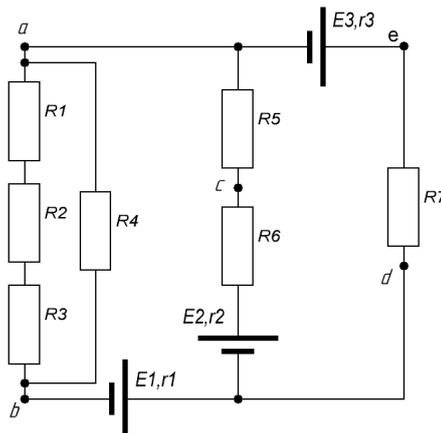


Рисунок 5.30

ЗАДАЧА 6. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПОСТОЯННЫХ ТОКОВ

Условие: На рисунке 6.0 в качестве примера показан контур из тонкого провода, состоящий из:

- двух прямолинейных участков с длинами R и l , каждый из которых расположен параллельно одной из осей координат;
- прямолинейного диагонального участка, лежащего в одной из координатных плоскостей;
- дуги с радиусом R и длиной в четверть окружности, плоскость которой перпендикулярна одной из координатных осей.

По контуру течет постоянный ток I . Подводящие провода расположены вплотную друг к другу параллельно одной из координатных осей и при решении задачи не учитываются.

Точка наблюдения P лежит на той координатной оси, которая является осью симметрии для окружности, содержащей проводник в четверть длины окружности. Координата точки P указана в таблице 6.1 как ξ_P .

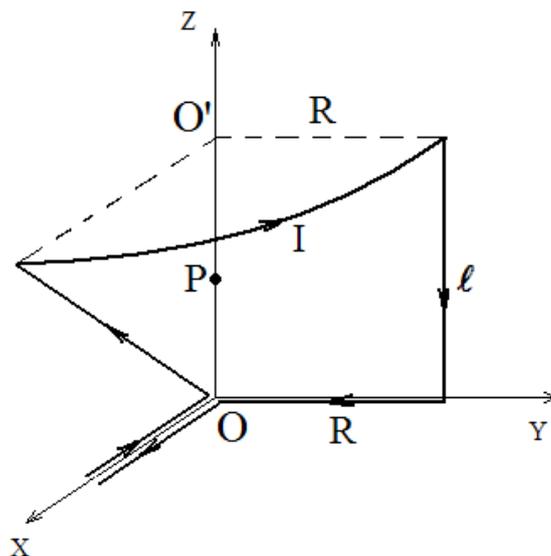


Рисунок 6.0 – схематическое изображение контура с током в пространстве

Задание 1: Используя закон Био-Савара-Лапласа, принцип суперпозиции и правило правой руки, вычислите в точке P проекции вектора индукции магнитного поля \vec{B} , создаваемого каждым из двух прямолинейных проводников длиной R и l с током I .

Решение:

Примечание 6.1. Индукция магнитное поля. Индукция магнитного поля \vec{B} является векторной физической величиной и характеризует величину и направление магнитного поля в данной точке пространства. В системе SI индукция магнитного поля измеряется в теслах Тл. Эта единица не является основной единицей системе SI ($1\text{Тл} = 1 \frac{\text{кг}}{\text{А}\cdot\text{с}^2}$).

Примечание 6.2. Закон Био-Савара-Лапласа. Индукцию магнитного поля, создаваемую проводниками с постоянным током, вычисляют с помощью закона Био-Савара-Лапласа:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0\mu}{4\pi} I \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}, \quad (6.1)$$

где $\frac{\mu_0\mu}{4\pi}$ – коэффициент пропорциональности в системе SI;

μ – магнитная проницаемость среды (для воздуха $\mu = 1$);

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

$\frac{\mu_0}{4\pi} = 1 \cdot 10^{-7}$ Гн/м – значение коэффициента для нашей задачи;

1 Гн (генри) – это единица индуктивности;

I – сила тока;

$I d\vec{l}$ – элемент проводника с током, имеющий направление или элемент тока;

\vec{r} – радиус-вектор, соединяющий элемент с током $I d\vec{l}$ с точкой, в которой определяется индукция (в случае нашей задачи – точка P);

$I d\vec{l} \times \vec{r}$ – векторное произведение, поэтому вектор индукции $d\vec{B}$ всегда перпендикулярен плоскости, в которой находятся вектора $I d\vec{l}$ и \vec{r} и его направление в общем случае определяется правилом векторного произведения.

Примечание 6.3. Принцип суперпозиции. Чтобы вычислить индукцию магнитного поля, создаваемую в данной точке пространства проводником произвольной длины и конфигурации, необходимо воспользоваться принципом суперпозиции:

$$\vec{B} = \sum d\vec{B}. \quad (6.2)$$

Другими словами, суммарный вектор индукции магнитного поля \vec{B} находится, как векторная сумма от всех элементов с током $I d\vec{l}$ данного проводника, на которые он условно разбивается для того, чтобы можно было воспользоваться законом **Био-Савара-Лапласа** (6.1), сформулированным для элемента проводника с током. Практическая процедура суммирования заменяется интегрированием.

Примечание 6.4. Правило правой руки.

Для определения направления индукции магнитного поля

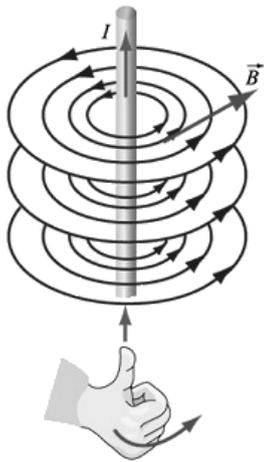


Рисунок 6.0 а – к определению направления вектора магнитной индукции \vec{B}

в выбранной точке пространства, создаваемого прямолинейным проводником с током (или элементом тока), пользуются правилом правой руки, помня, что индукция \vec{B} всегда перпендикулярна плоскости, в которой находятся проводник с током и радиус-вектор, направленный от элемента с током в точку, где определяется индукция. Правило правой руки гласит, что если большой палец правой руки направить по току, то остальные полусогнутые пальцы укажут направление силовых линий магнитного поля, имеющих вид замкнутых окружностей, охватывающих проводник с током.

Силовые линии магнитного поля – это условные линии, в каждой точке которых индукция магнитного поля направлена по касательной (рисунок 6.0 а).

Перейдем к вычислению индукции магнитного поля, создаваемую прямолинейным проводником длиной l с током I в точке P , лежащей на оси Z (см. рисунок 6.0).

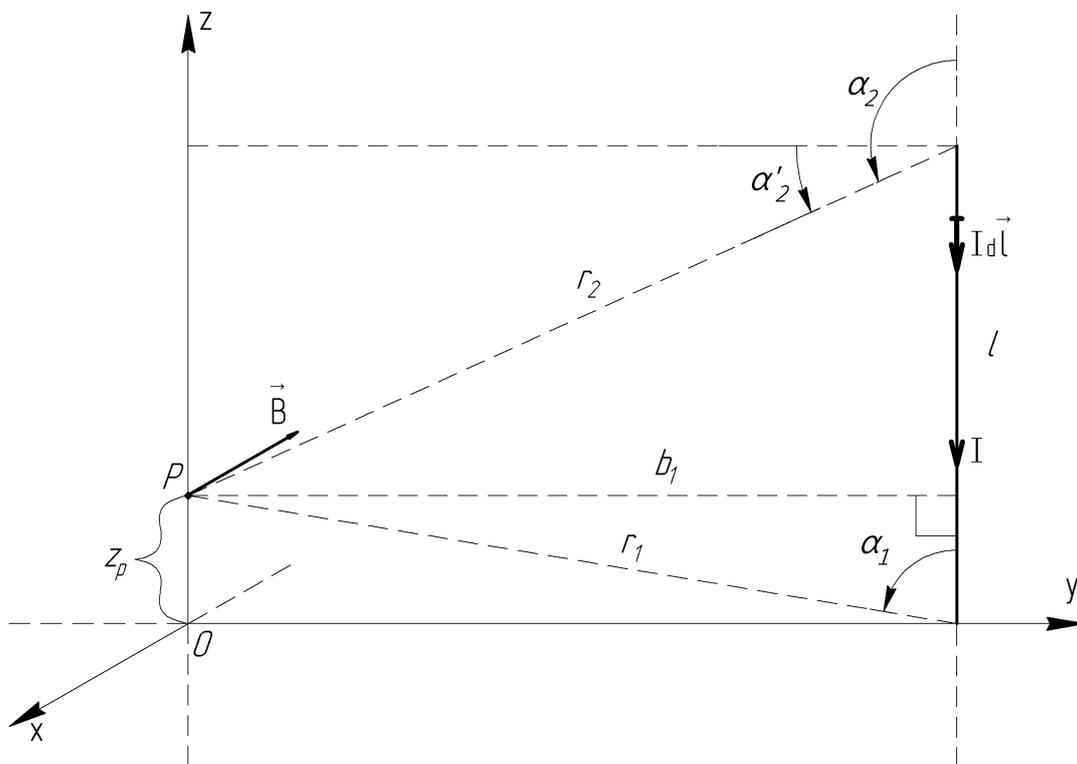


Рисунок 6.0 б – к вычислению индукции магнитного поля, создаваемого проводником с током длиной l

Воспользуемся правилом правой руки, чтобы для произвольно выбранного элемента с током $I \vec{dl}$ на прямолинейном проводнике длиной l определить направление индукции $d\vec{B}^l$, принимая во внимание, что вектора $I \vec{dl}$ и \vec{r} лежат в плоскости ZOY (рисунок 6.0 а и 6.0 б). Значит в соответствии с законом Био-Савара-Лапласа (6.1) индукция от элемента с током $I \vec{dl}$ в т. P может быть направлена только по оси X (ось X перпендикулярна плоскости, в которой находятся вектора $I \vec{dl}$ и \vec{r}). Но ось X , как и любая другая ось, имеет два направления: «к нам» – это положительное направление и «от нас» – это отрицательное направление. Окончательный ответ даёт правило правой руки. Направив большой палец правой руки по току (см. рисунки 6.0 а и 6.0 б), видим, что полусогнутые пальцы показывают на направление силовых линий магнитного поля проводника с током I , уходящих за плоскость ZOY , т. е. индукция магнитного поля направлена «от нас», что совпадает в данном случае с отрицательным направлением оси X .

Так как все элементы с током $I \vec{dl}$ для проводника l дают одинаковое направление индукции в точке P , то все вектора $d\vec{B}^l$ имеют также одинаковое направление, совпадающее с отрицательным направлением оси X . Обозначив индукцию магнитного поля в точке P , создаваемую прямолинейным проводником длиной l , как B_x^l , и помня о её отрицательном направлении: $-B_x^l$, можем перейти к вычислению значения B_x^l .

Для вычисления величины B_x^l воспользуемся законом Био-Савара-Лапласа (6.1). Тогда для произвольно выбранного элемента с током $I \vec{dl}$ (рисунок 6.0 б) величина индукции магнитного поля в проекции на ось X и с учётом векторного произведения будет равна:

$$dB_x = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{dl \cdot r \cdot \sin \alpha}{r^3} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{dl \cdot \sin \alpha}{r^2}, \quad (6.3)$$

где α – угол между элементом с током $I \vec{dl}$ и радиусом-вектором \vec{r} . Но прежде чем перейти к вычислению B_x^l , рассмотрим пример применения закона Био-Савара-Лапласа к прямолинейному проводнику конечной длины с током.

Примечание 6.5. Вычисление индукции магнитного поля, создаваемого прямолинейным проводником конечной длины.

Так как элемент с током $I \vec{dl}$ и радиус-вектор \vec{r} лежат в плоскости рисунка 6.0 с, то, согласно правилу правой руки, индукция магнитного поля $d\vec{B}$, создаваемая элементом с током $I \vec{dl}$ в точке A , будет направлена «от нас» \otimes . Это направление сохранится для всех элементов с током, на которые условно разбит проводник с током. Тогда на основании закона Био-Савара-Лапласа (6.3) запишем:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{dl}{r^2} \sin \alpha. \quad (6.4)$$

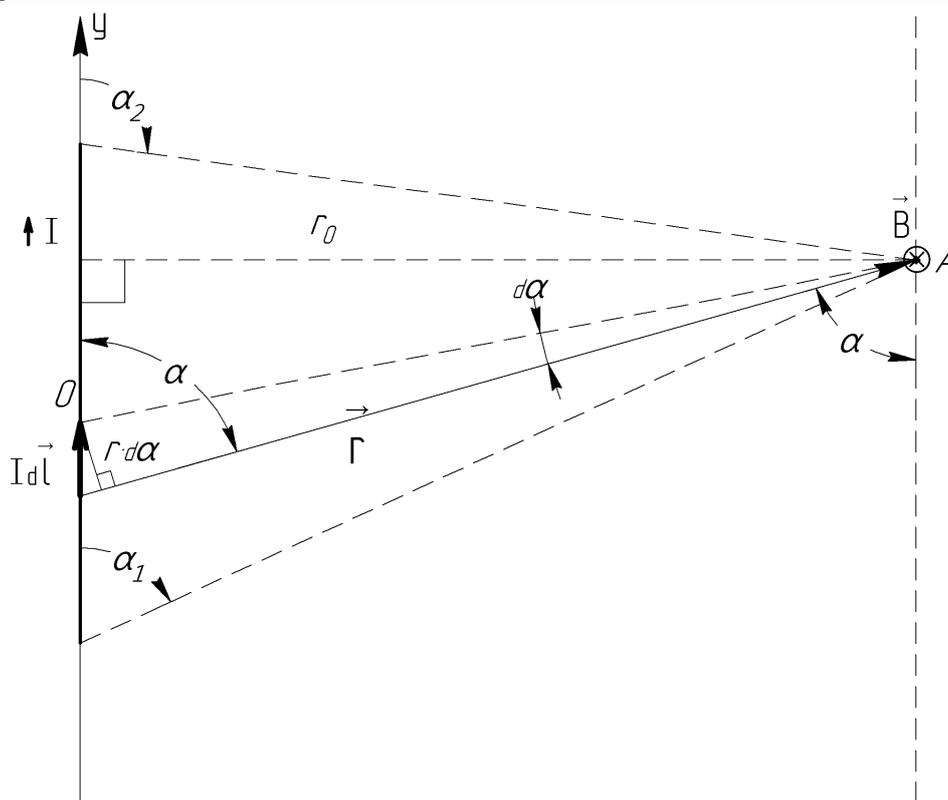


Рисунок 6.0 с – к вычислению индукции магнитного поля

В выражении (6.4) три переменные величины α , r и $d\mathbf{l}$, что требует для подготовки к интегрированию (принцип суперпозиции) провести замену переменных.

В качестве переменной интегрирования выберем угол α и выразим через него r и $d\mathbf{l}$.

Из прямоугольного треугольника (рисунок 6.0 с) запишем:

$$\sin \alpha = \frac{r_0}{r}, \quad (6.5)$$

откуда $r = \frac{r_0}{\sin \alpha},$

где r_0 – кратчайшее расстояние от проводника с током к точке A .

Из вспомогательного прямоугольного треугольника с гипотенузой $I d\mathbf{l}$ (рисунок 6.0 с) и катетом $r d\alpha$ ($d\alpha$ – центральный угол) запишем:

$$\sin \alpha = \frac{r d\alpha}{dl}, \quad (6.6)$$

откуда $dl = \frac{r d\alpha}{\sin \alpha}.$

Подставив выражение (6.5) и (6.6) в (6.4), получаем:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{dl}{r^2} \sin \alpha = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{r_0 d\alpha}{\sin^2 \alpha} \frac{\sin^2 \alpha}{r_0^2} \sin \alpha = \frac{\mu_0}{4\pi r_0} I \sin \alpha d\alpha. \quad (6.7)$$

Табличный неопределённый интеграл $\int \sin \alpha \, d\alpha = -\cos \alpha + C$, где C – постоянная интегрирования.

Тогда для определённого интеграла, получаем:

$$B = \int dB = \frac{\mu_0}{4\pi r_0} I \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin \alpha \, d\alpha = \frac{\mu_0}{4\pi r_0} I (-\cos \alpha) \Big|_{\alpha_1}^{\alpha_2} =$$

$$= \frac{\mu_0}{4\pi r_0} I (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2), \quad (6.8)$$

где α_1 и α_2 – пределы интегрирования по углу, которые определяются длиной проводника с током.

Формула (6.8), полученная из закона Био-Савара-Лапласа, позволяет вычислить индукцию магнитного поля в любой точке, которое создаётся прямолинейным проводником конечной длины с током.

Вычислим индукцию магнитного поля в точке P , создаваемую проводником с током I длиной l (см. рисунок 6.0 б). Для вычисления воспользуемся формулой (6.8), полученной из закона Био-Савара-Лапласа, помня, что индукция магнитного поля от проводника l с током I направлена «от нас» (правило правой руки), то есть по оси X в отрицательную сторону:

$$-B_x^l = -\frac{\mu_0}{4\pi b_1} I (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2), \quad (6.9)$$

где b_1 – кратчайшее расстояние от проводника l к точке P (здесь $b_1 = R$ – см. рисунок 6.0), а α_1 и α_2 – предельные углы (см. рисунок 6.0 б).

Примечание 6.6. Предельные углы интегрирования α_1 и α_2 (см. рисунок 6.0 б) следует всегда откладывать от линии проводника с током в одну сторону: или по часовой стрелке, или против часовой стрелки.

Примечание 6.7. В формуле (6.9) значения величин b_1 , α_1 и α_2 в каждом варианте рисунка будут свои.

Заметим, что α_1 – острый угол и вычисляется из прямоугольного треугольника через $\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{b_1}{Z_P}$, где Z_P – координата точки P , угол α_2 – тупой, где к $\frac{\pi}{2}$ требуется ещё добавить острый угол α'_2 , вычисленный также через $\operatorname{tg} \alpha'_2 = \frac{l - Z_P}{a_1}$, т. е. $\alpha_2 = \frac{\pi}{2} + \alpha'_2$.

Согласно формулам приведения тригонометрических функций:

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha'_2\right) = -\sin \alpha'_2.$$

Тогда окончательно получаем ($b_1 = R$):

$$-B_x^I = -\frac{\mu_0}{4\pi R} I (\cos \alpha_1 + \sin \alpha'_2). \quad (6.10)$$

Заметим, что знак проекции индукции магнитного поля удобнее приписывать заранее. Это упрощает вычисления, хотя знак должен получаться автоматически при правильной подстановке пределов интегрирования и отложении углов против часовой стрелки.

Действуя аналогичным образом, вычислим индукцию магнитного поля в точке P , создаваемую прямолинейным отрезком проводника длиной R с током I (см. рисунок 6.0), заметив, что согласно правилу правой руки, индукция от проводника длиной R также будет направлена «от нас», т. е. вдоль оси X в отрицательном её направлении (рисунок 6.0 d).

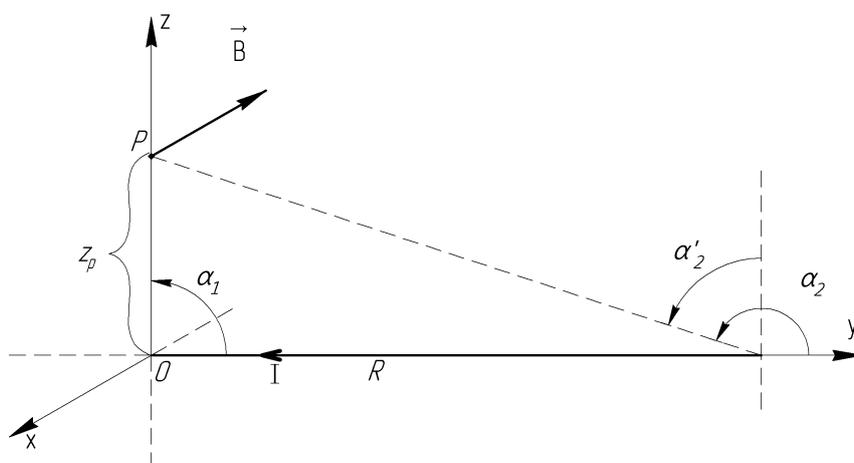


Рисунок 6.0 d – к вычислению индукции магнитного поля, создаваемого проводником с током длиной R

Значит,

$$B_x^R = \frac{\mu_0}{4\pi b_2} I (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2),$$

где кратчайшее расстояние от проводника R к точке P равно Z_p ($b = Z_p$).

Здесь угол $\alpha_1 = \frac{\pi}{2}$, а угол α_2 – тупой, т. е. $\alpha_2 = \frac{\pi}{2} + \alpha'_2$, где α'_2 – вычисляется как $\operatorname{tg} \alpha'_2 = \frac{R}{Z_p}$. Тогда:

$$-B_x^R = -\frac{\mu_0}{4\pi Z_p} I (\cos \frac{\pi}{2} + \sin \alpha'_2). \quad (6.11)$$

Задание 2. Вычислите проекцию вектора индукции магнитного поля \vec{B} в точке P , создаваемого диагональным участком проводника с током I , лежащим в одной из координатных плоскостей (см. рисунок 6.0), используя закон Био-Савара-Лапласа, принцип суперпозиции и правило правой руки.

Решение: Согласно рассматриваемому примеру (рисунок 6.0), диагональный участок проводника с током I лежит в плоскости ZOX . Нарисуем дополни-

тельный рисунок 6.0 е, расположив его для удобства в плоскости листа бумаги и развернув так, чтобы ось Ox смотрела вправо.

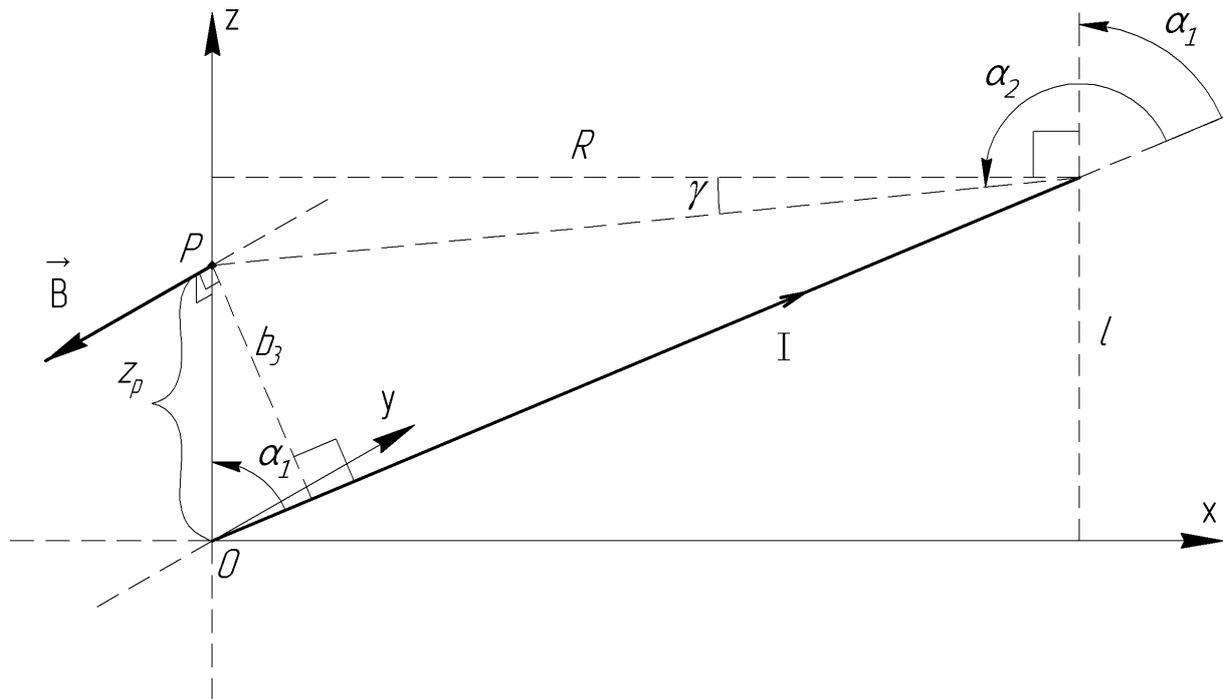


Рисунок 6.0 е – к вычислению индукции магнитного поля, создаваемого диагональным участком проводника с током I

Согласно правилу правой руки индукция от каждого элемента с током $I \vec{dl}$ диагонального проводника в т. P будет перпендикулярна плоскости ZOX и направлена «к нам», т. е. суммарный вектор магнитной индукции в точке P от диагонального проводника с током будет имеет отрицательную проекцию на ось Y : $-B_y^d$.

Тогда, согласно (6.8):

$$-B_y^d = -\frac{\mu_0}{4\pi b_3} I (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2), \quad (6.12)$$

где b_3 – кратчайшее расстояние от диагонального проводника к точке P ; α_1 и α_2 – предельные углы.

Из рисунка 6.0 е находим:

$$\cos \alpha_1 = \frac{l}{\sqrt{l^2 + R^2}} \quad \text{и} \quad \sin \alpha_1 = \frac{R}{\sqrt{l^2 + R^2}},$$

где $\sqrt{l^2 + R^2}$ – длина диагонального проводника. Значения $\cos \alpha_1$ и $\sin \alpha_1$ могут быть вычислены сразу после подстановки численных данных.

Также из рисунка 6.0 е можно выразить $\sin \alpha_1$ через кратчайшее расстояние до точки P – b_3 :

$$\sin \alpha_1 = \frac{b_3}{z_p},$$

откуда $b_3 = z_p \cdot \sin \alpha_1$.

Из рисунка 6.0 е также видно, что угол $\alpha_2 = \alpha_1 + \frac{\pi}{2} + \gamma$, т. е.

$\cos \alpha_2 = \cos \left(\alpha_1 + \frac{\pi}{2} + \gamma \right) = -\sin(\alpha_1 + \gamma)$, согласно формулам приведения тригонометрических функций.

Тогда распишем $-\sin(\alpha_1 + \gamma)$ как \sin суммы двух углов:

$$-\sin(\alpha_1 + \gamma) = -(\sin \alpha_1 \cdot \cos \gamma + \cos \alpha_1 \cdot \sin \gamma).$$

Из рисунка 6.0 е вычислим $\sin \gamma$ и $\cos \gamma$:

$$\sin \gamma = \frac{l - Z_p}{\sqrt{R^2 + (l - Z_p)^2}} \quad \text{и} \quad \cos \gamma = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (l - Z_p)^2}}.$$

Подставив полученные значения величин b_3 , α_1 и α_2 в формулу (6.12), вычислим значение индукции магнитного поля \mathbf{B}_y^d в точке P , создаваемого диагональным проводником с током I , помня об отрицательном значении проекции $-\mathbf{B}_y^d$.

Задание 3. Вычислите проекцию вектора индукции магнитного поля \vec{B} в точке P , создаваемого проводником в виде дуги длиной в четверть окружности, по которому течет ток I , используя закон Био-Савара-Лапласа, принцип суперпозиции и правило правой руки.

Решение: Из рисунка 6.0 f видно, что вектор $d\vec{B}$ (правило правой руки), перпендикулярный плоскости, содержащей элемент с током $I d\vec{l}$ и радиус-вектор \vec{r} , направленный в точку P , будет изменять своё положение при переходе от одного элемента с током к другому, вращаясь вокруг точки P в квадранте $(-y'') P (-x'')$.

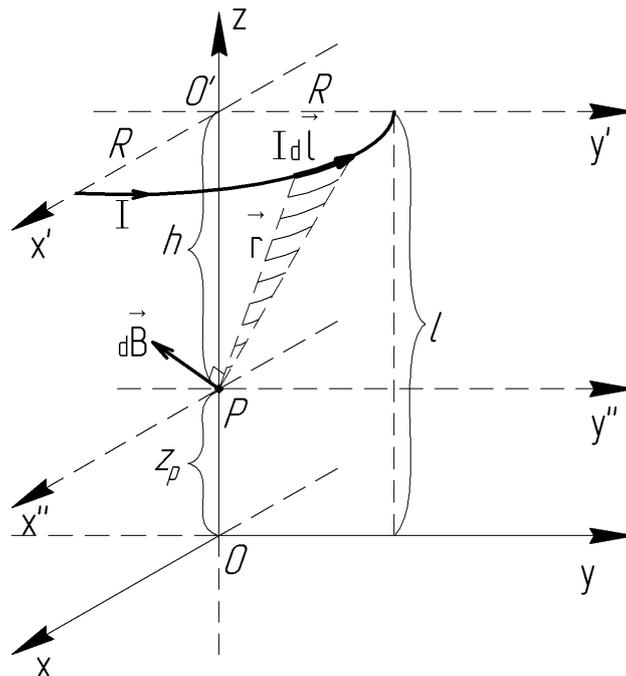


Рисунок 6.0 f – к вычислению индукции магнитного поля, создаваемого проводником в виде дуги длиной в четверть окружности с током I

Другими словами, положение вектора $d\vec{B}$ будет всё время изменяться, поэтому вектор $d\vec{B}$ следует спроецировать вначале на ось Z ($+dB_z^S$) и на плоскость $(-y'')P(-x'')$. В свою очередь проекция вектора на плоскость $(-y'')P(-x'')$ даёт две одинаковые в данном случае отрицательные проекции на оси $(-y'')$ и $(-x'')$: $-dB_x^S = -dB_y^S$.

Формулы для вычисления этих проекций получаются также из закона Био-Савара-Лапласа. Воспользуемся готовыми результатами:

$$-B_x^S = -B_y^S = -\frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{h \cdot R}{(h^2 + R^2)^{3/2}}, \quad (6.13)$$

где h – удаление от плоскости кольца, содержащего четверть дуги проводника с током, до точки P . В нашем случае $h = l - Z_P$.

$$B_z^S = \frac{\mu_0}{8} I \frac{R^2}{(h^2 + R^2)^{3/2}}. \quad (6.14)$$

Примечание 6.8. Вычисляя три проекции вектора индукции, которые даёт проводник с током в виде дуги, важно из рисунка (см. рисунок 6.0 f) сразу определиться со знаком проекций.

Задание 4: Вычислите результирующий вектор магнитной индукции \vec{B}_P в точке P , создаваемый контуром из трёх прямолинейных проводников и проводника в виде дуги с током I , и изобразите вектор \vec{B}_P на своём рисунке с указанием углов относительно осей координат.

Примечание 6.9. Для того, чтобы найти величину вектора \vec{B}_P , необходимо воспользоваться теоремой Пифагора, предварительно сложив проекции индукции по осям с учётом знака.

Так, например, в нашем случае:

$$B_P = \sqrt{(-B_x^l - B_x^R - B_x^S)^2 + (-B_y^d - B_y^S)^2 + (B_z^S)^2}. \quad (6.15)$$

Примечание 6.10. Для определения направления вектора \vec{B}_P необходимо вычислить направляющие косинусы между вектором \vec{B}_P и осями координат:

$$\cos(\vec{i}; \vec{B}_P) = \frac{\sum B_x}{B_P}; \quad \cos(\vec{j}; \vec{B}_P) = \frac{\sum B_y}{B_P}; \quad \cos(\vec{k}; \vec{B}_P) = \frac{\sum B_z}{B_P}.$$

Здесь \vec{i} , \vec{j} и \vec{k} – единичные векторы, указывающие соответственно направление координатных осей x , y и z . Суммировать проекции B_x , B_y и B_z необходимо с учётом знака (6.15).

**ЧИСЛЕННЫЕ ДАННЫЕ К ЗАДАЧЕ 6
«МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПОСТОЯННЫХ ТОКОВ»**

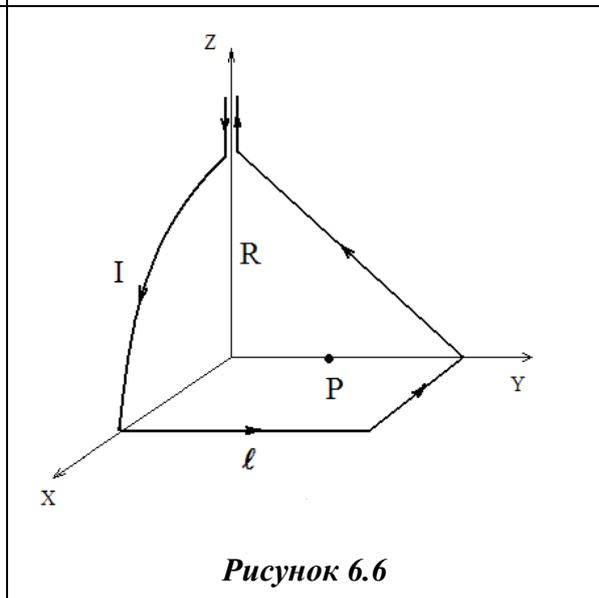
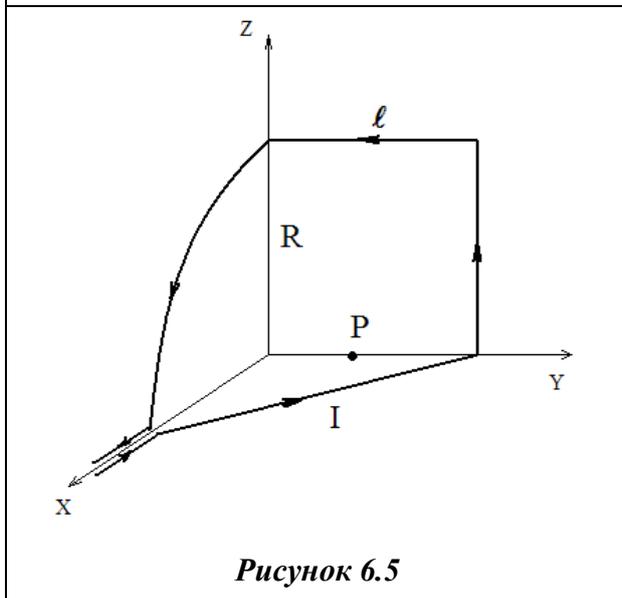
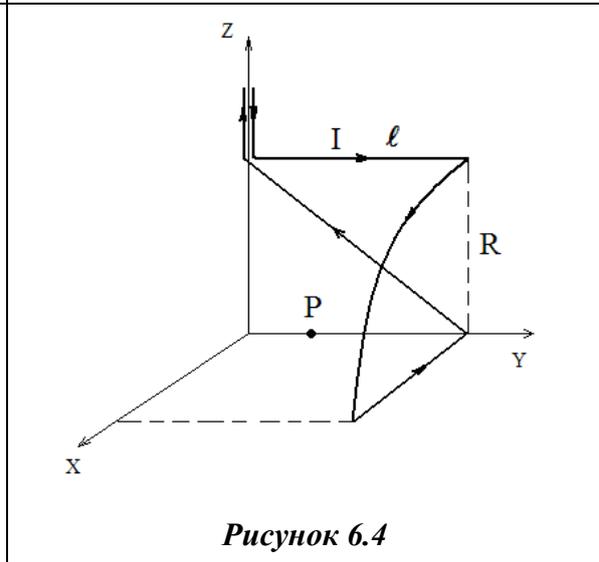
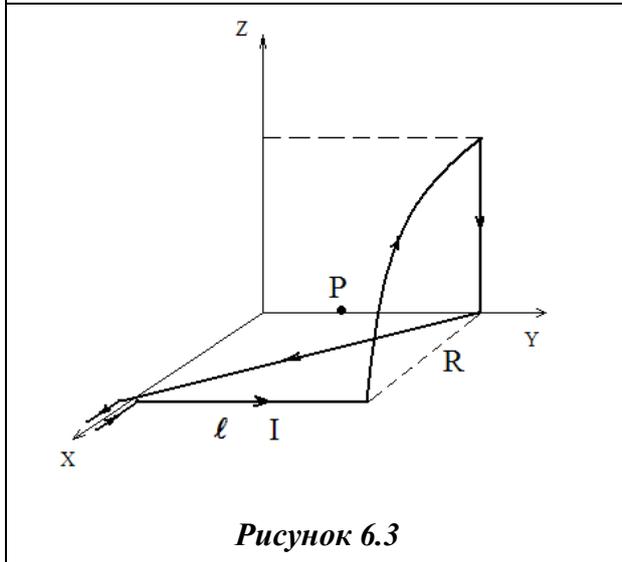
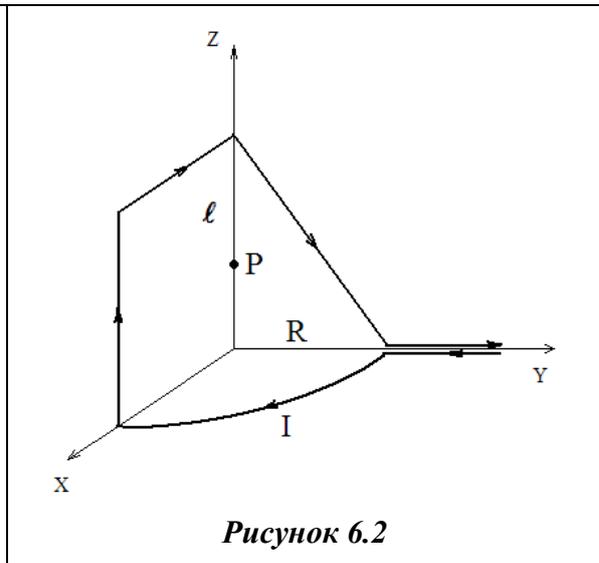
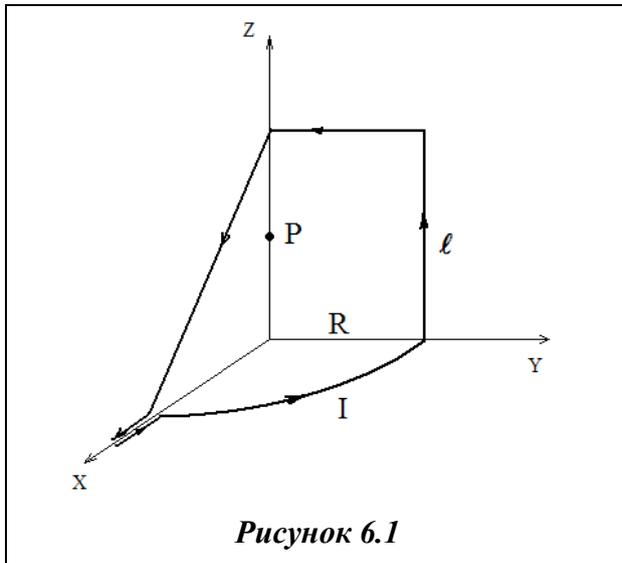
(вариант численных данных таблицы 6.1 совпадает с Вашим порядковым номером в списке группы или двумя последними цифрами шифра)

Таблица 6.1 – численные данные

вариант	I, А	R, м	l, м	ξ_p, м
1	40	0,5	0,6	0,35
2	60	1,5	0,9	1,15
3	80	0,55	0,6	-0,4
4	100	1,45	1,3	1,0
5	120	0,6	0,9	1,65
6	140	1,4	0,8	-0,1
7	160	0,65	0,55	0,55
8	180	1,35	1,1	1,7
9	200	0,7	0,65	-0,55
10	220	1,3	0,6	0,55
11	240	0,75	1,05	1,35
12	260	1,25	0,9	-0,45
13	280	0,8	1,25	0,45
14	300	1,2	0,85	1,6
15	320	0,85	0,9	-0,45
16	340	1,15	0,6	0,15
17	360	0,9	1,25	2,05
18	380	1,1	0,65	-0,55
19	400	0,95	0,9	0,75
20	420	1,05	1,3	2,1
21	440	1	0,9	-0,2
22	460	1	1,05	0,3
23	480	1,05	1,05	1,6
24	500	0,95	0,65	-0,2
25	520	1,1	1,1	0,4
26	540	0,9	1,25	1,9
27	560	1,15	0,65	-0,15
28	580	0,85	1,35	1,15
29	600	1,2	1,2	1,65
30	620	0,8	0,7	-0,15

РИСУНКИ К ЗАДАЧЕ 6 «МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПОСТОЯННЫХ ТОКОВ»

(номер рисунка выбирается по последней цифре Вашего
порядкового номера в списке группы или шифра)



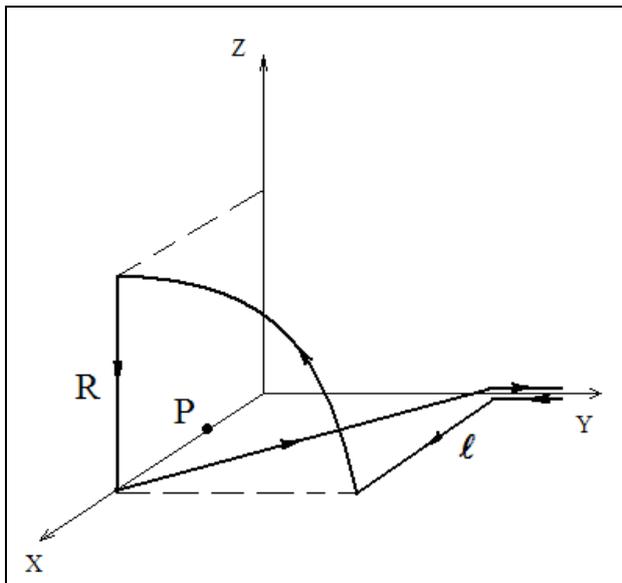


Рисунок 6.7

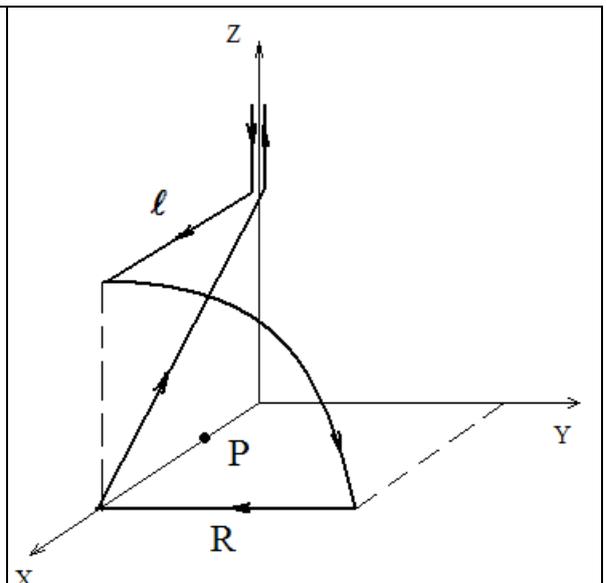


Рисунок 6.8

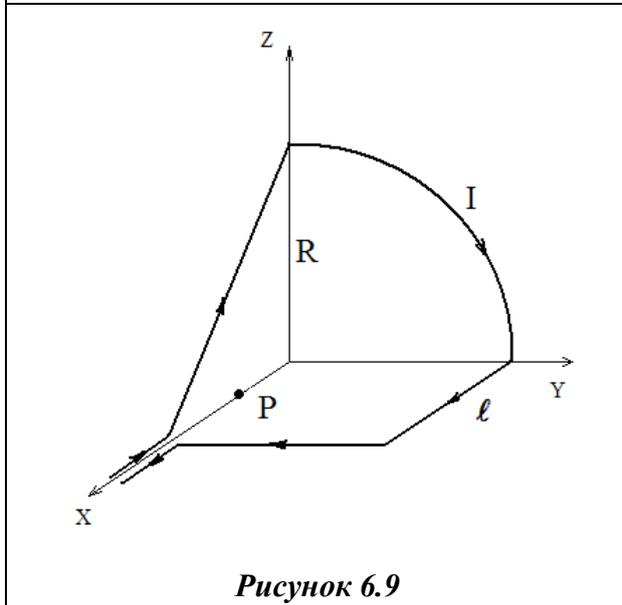


Рисунок 6.9

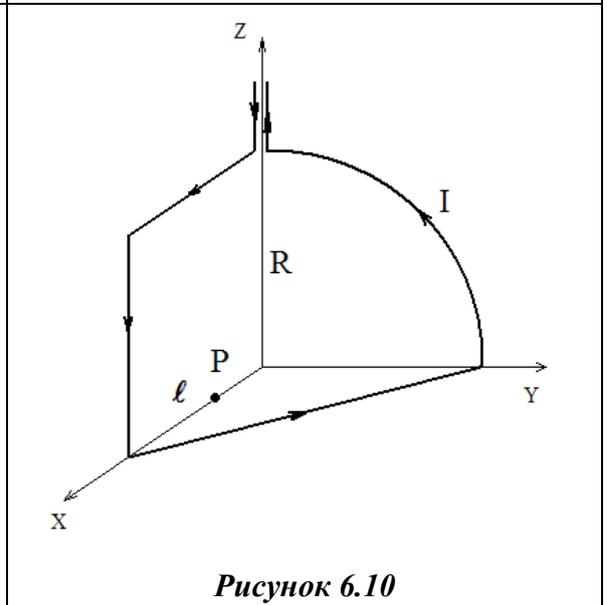


Рисунок 6.10

Авторы благодарят *Савчука Анатолия Демьяновича* за помощь в подготовке рисунков к индивидуальным заданиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чопчиц, Н. И. Комплексные задачи по физики / Н. И. Чопчиц. – Брест: Изд-во БрГТУ, 2014. – 108 с.
2. Чопчиц, Н. И. Современная парадигма физпрактикума по решению задач и комплексные задачи по физики / Н. И. Чопчиц, А. А. Гладыщук. Тезісы рэспублік. нав.-метод. канф. Методыка выкладання дысціплін фізічнага профілю ў вышэйшых навучальных установах. – Брэст, 1992. – С. 10.
3. Гладыщук, А. А. Концепция и практический опыт преподавания физики в Брестском политехническом институте / А. А. Гладыщук. Тезісы рэспублік. нав.-метод. канф. Методыка выкладання дысціплін фізічнага профілю ў вышэйшых навучальных установах. – Брэст, 1992. – С. 18.
4. Комплексные задачи в курсе физики //– Методические материалы по вопросам преподавания физики в высшей школе республики. Н.И. Чопчиц [и др.]. – Минск, 1991. – С. 114.
5. Барковская М. М., ФИЗИКА I / М.М. Барковская [и др.] – Брест: Изд-во БрГТУ, 2019. – 63 с.

Учебное издание

Составители:

Барковская Марина Михайловна

Гладыщук Анатолий Антонович

Савчук Оксана Федоровна

ФИЗИКА II

**Методические рекомендации
для выполнения самостоятельной работы
с индивидуальными домашними заданиями
для студентов технических специальностей
дневной и заочной форм обучения**

Ответственный за выпуск: Гладыщук А.А.

Редактор: Боровикова Е.А.

Компьютерная вёрстка: Соколюк А.П.

Корректор: Дударук С.А.

Подписано в печать 02.03.2021 г. Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага «Performer».
Гарнитура «Times New Roman». Усл. печ. л. 3,26. Уч. изд. л. 3,50. Заказ № 1329. Тираж 22 экз.
Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный
технический университет». 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.