

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ



КАФЕДРА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Лабораторная работа № 1П

“Моделирование электростатического поля коаксиального кабеля полем
стационарных токов в проводящей среде”

Выполнил:	
Группа:	
Проверил:	

Москва 2019

Лабораторная работа № 1П

Моделирование электростатического поля коаксиального кабеля полем стационарных токов в проводящей среде

Цель работы

Исследование электростатического поля коаксиального кабеля (картины распределения вектора напряженности и потенциала в диэлектрической среде изоляции) методом физического моделирования плоскопараллельным полем стационарных токов между электродами в листе проводящей бумаги, и сопоставление результатов физического моделирования с результатами аналитического решения и численного (компьютерного) моделирования данной задачи.

Ключевые слова: коаксиальный кабель; электростатическое поле; напряженность; потенциал; емкость; физическая модель; компьютерная модель.

Теоретическая справка

Объект моделирования - коаксиальный кабель представляет собой симметричную систему соосных проводников (жила и оболочка) с диэлектрической изоляцией между жилой и оболочкой. Электрическое поле кабеля является плоскопараллельным, так как распределение векторов напряженности и потенциала во всех параллельных плоскостях, нормальных к оси кабеля, является одинаковым.

Физическая аналоговая модель кабеля. В связи с тем, что измерение параметров поля реального кабеля путем внесения датчиков внутрь его твердой изоляции, во-первых, проблематично и, во-вторых, заведомо нарушит картину поля, целесообразно физическое исследование поля кабеля провести на его аналоговой модели.

Моделирование плоскопараллельного электростатического поля проводят посредством экспериментального исследования электрического стационарного поля токов в проводящей среде (проводящей бумаге), ограниченной металлическими электродами, имитирующими оболочку и жилу коаксиального кабеля, используя аналогию в их математическом описании и свойство подобия этих полей (физическая аналоговая модель кабеля). Экспериментальное измерение распределения потенциала на поверхности проводящего слоя бумаги с помощью металлического зонда удобно в осуществлении и не вызывает заметного возмущения поля в проводящей среде. Размеры объекта и физической модели могут отличаться, подобной должна быть геометрия системы. При выборе физической модели для исследования плоскопараллельного поля кабеля необходимо учитывать два обстоятельства. Во-первых, емкость кабеля зависит не от значений

геометрических размеров радиуса жилы и оболочки кабеля R_1, R_2 , а от соотношений R_2/R_1 , поэтому размеры модели R'_1, R'_2 могут быть отличными от размеров кабеля и наиболее удобными для измерений потенциалов поля. Важно лишь сохранить отношение $R'_2/R'_1 = R_2/R_1$. Во-вторых, исследовать плоскую физическую модель сечения кабеля с диэлектрической средой проблематично, иное дело исследовать плоскую модель с проводящей средой (электролитом, проводящей бумагой). Подобной моделью можно воспользоваться, так как имеет место аналогия между электростатическим полем и электрическим полем постоянных токов в проводящей среде. Уравнения и расчетные формулы этих полей совпадают с точностью до формальной замены параметров $\tau \leftrightarrow I_0$, $\varepsilon_r \varepsilon_0 \leftrightarrow \gamma$, $C_0 \leftrightarrow G_0$ (табл. 1).

Таблица 1

Электростатическое поле	E [В/м]	φ [В]	τ [Кл/м]	$\varepsilon_r \varepsilon_0$ [Ф/м]	C_0 [Ф/м]
Электрическое поле постоянных токов в проводящей среде	E [В/м]	φ [В]	I_0 [А/м]	γ [См/м]	G_0 [См/м]

Расчет поля коаксиального кабеля

При однородной диэлектрической изоляции между жилой и оболочкой осесимметричного кабеля модуль вектора напряженности выражается равенством

$$E(r) = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon r} \text{ [В/м]},$$

где τ - заряд на единицу длины кабеля [Кл/м], $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$ - абсолютная диэлектрическая проницаемость изоляции (ε_r - относительная диэлектрическая проницаемость изоляции, ε_0 – электрическая постоянная); r –расстояние от центра (оси), кабеля до рассматриваемой точки, откуда следует выражение для потенциала как интеграла от напряженности

$$\varphi(r) = \int_{R_2}^r E(r) dr = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon} \ln \frac{R_2}{r} \text{ [В]}$$

и напряжение между жилой и оболочкой

$$U = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon} \ln \frac{R_2}{R_1} \text{ [В]},$$

где R_1 и R_2 – соответственно радиус жилы и внутренний радиус оболочки (Рис. 1).

Электрическая емкость на единицу длины коаксиального кабеля (погонная емкость):

$$C_0 = \frac{\tau}{U} = \frac{2\pi\varepsilon}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \quad [\Phi/\text{М}].$$

Модуль напряженности электрического поля может быть выражен через напряжение между жилой и оболочкой:

$$E(r) = \frac{U}{r \ln \frac{R_2}{R_1}}, \quad R_1 \leq r \leq R_2.$$

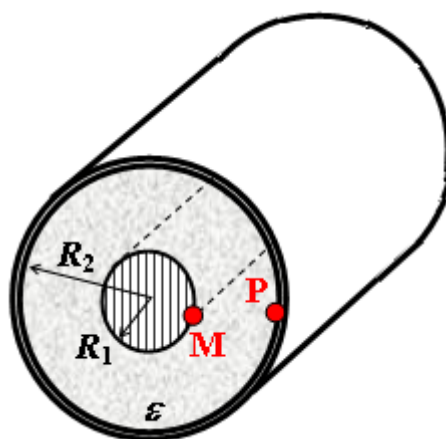


Рис. 1

Максимальная напряженность, как следует из зависимости $E(r)$, наблюдается в точке М, расположенной на поверхности жилы при $r = R_1$. Таким образом,

$$E_{\max} = E_M = E(R_1) = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon R_1} = \frac{U}{R_1 \ln \frac{R_2}{R_1}}.$$

Максимальная напряженность не должна превышать допустимую напряженность изоляции¹ $E_{\max} \leq E_{\text{доп}}$; максимально допустимое напряжение может быть определено из условия $E_{\max} = \frac{U_{\max}}{R_1 \ln \frac{R_2}{R_1}} \leq E_{\text{доп}}$. Следовательно, $U_{\max} = E_{\text{доп}} \cdot R_1 \ln \frac{R_2}{R_1}$.

В ряде случаев (технологический сбой, условия эксплуатации) жила смещается относительно центральной оси. Нарушение симметрии приводит к усложнению решения задачи расчета поля (расчет положения электрических осей) и ухудшению характеристик кабеля (максимально допустимое напряжение). Расчет поля коаксиального несоосного

¹ Допустимая напряженность $E_{\text{доп}}$ или $E_{\text{проб}}$ для воздуха $E_{\text{проб}} = 30$ кВ/см, твердого диэлектрика $E_{\text{проб}} = 60 \div 200$ кВ/см, масла $E_{\text{проб}} = 54$ кВ/см.

кабеля, поля параллельных цилиндрических проводов конечного сечения проводится на основании следствия теоремы существования и единственности и сводится к использованию известных формул расчета поля двухпроводной линии.

Для расчета поля кабеля со смещением центра жилы относительно центра оболочки необходимо найти положение электрических осей $(+\tau, -\tau)$ в поле параллельных цилиндров с несовпадающими геометрическими осями (жилы и оболочки радиусами R_1 и R_2) при заданном d – смещении (расстоянию между центрами цилиндров или геометрическими осями) так, чтобы картина поля двухпроводной линии $(+\tau, -\tau)$ и реальных параллельных цилиндров с несовпадающими осями совпадала. При этом решение справедливо только в той области, где существует реальное поле, т.е. в области изоляции, ограниченной радиусами R_1 и R_2 . Для этого находят положение начала координат (S_1 и S_2 – расстояние от центров цилиндров до начала координат) и расстояние $2a$ между электрическими осями $(+\tau, -\tau)$ (Рис. 2) по следующим формулам:

$$S_1 = \frac{R_2^2 - R_1^2 - d^2}{2d}, \quad S_2 = S_1 + d, \quad a = \sqrt{S_1^2 - R_1^2} = \sqrt{S_2^2 - R_2^2}.$$

Расчет емкости на единицу длины кабеля со смещением центра жилы относительно центра оболочки проводится следующим образом:

1) рассчитываются расстояния от $+\tau$ и $-\tau$ (электрических осей) до точки М на поверхности жилы r_M^+ , r_M^- и, соответственно, до точки Р на поверхности оболочки r_P^+ , r_P^- ;

2) потенциалы точек на поверхности жилы (при $\varphi(0) = 0$) $\varphi_M = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_r\epsilon_0} \ln \frac{r_M^-}{r_M^+} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon} \ln k_M$,

на поверхности оболочки $\varphi_P = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_r\epsilon_0} \ln \frac{r_P^-}{r_P^+} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon} \ln k_P$;

3) напряжение между жилой и оболочкой $U = \varphi_M - \varphi_P = \frac{\tau}{2\pi\epsilon} \ln \frac{k_M}{k_P}$, следовательно,

$$C_0 = \frac{\tau}{U} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{k_M}{k_P}} \text{ [Ф/м]}.$$

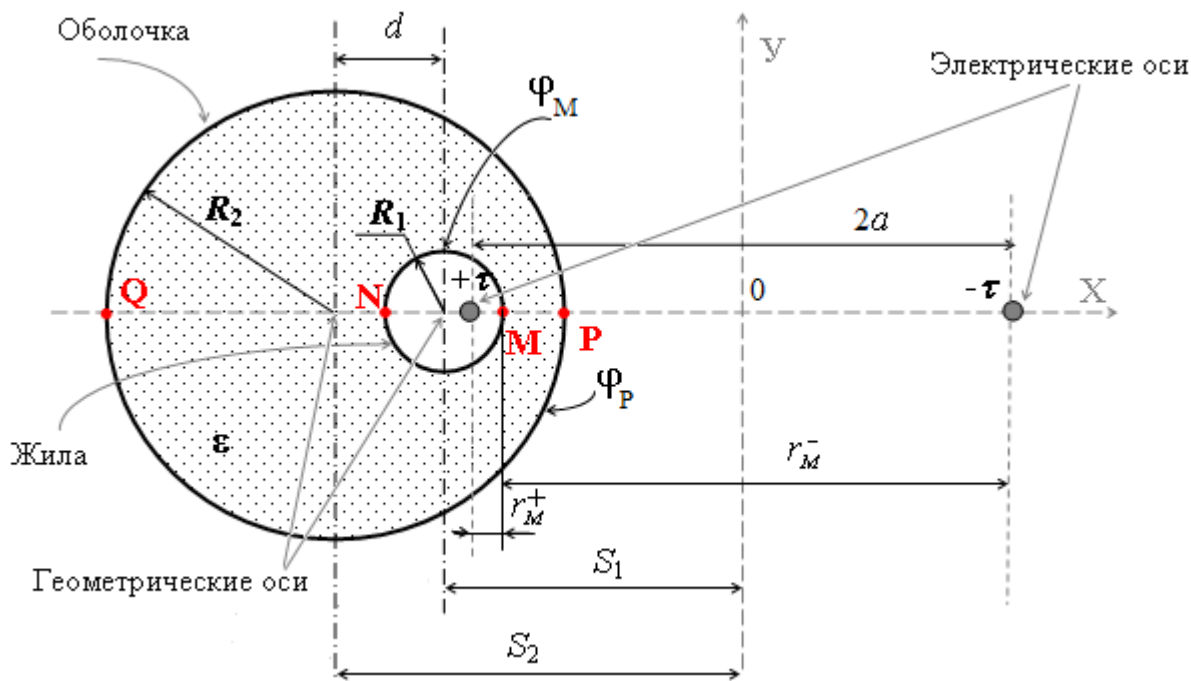


Рис. 2

Напряженность в точках, расположенных на оси OX (в точках M, N, P и Q)

$$\vec{E}(x) = \vec{E}^{(+\tau)}(x) + \vec{E}^{(-\tau)}(x), \quad E^{(+\tau)} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon} \frac{1}{r^+}, \quad E^{(-\tau)} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon} \frac{1}{r^-},$$

где r^+ - расстояние от рассматриваемой точки до положительной электрической оси $+\tau$, r^- - расстояние до отрицательной электрической оси $-\tau$. Максимальная напряженность будет в точке M. Значение $E_M \leq E_{\text{доп}}$ определяет предельно допустимую линейную плотность заряда τ_{max} и максимальное напряжение $U_{\text{max}} = \frac{\tau_{\text{max}}}{C_0}$.

Изображение картины поля путем нанесения линий равного потенциала (эквипотенциалей) при неизменной разности потенциалов между соседними линиями, дает наглядное представление о характере поля. Для поля параллельных цилиндров с несовпадающими осями эквипотенциалы – неконцентрические окружности радиуса R_0 с центрами на оси X. Положение центра X_0 эквипотенциалей могут быть рассчитаны при известном положении электрических осей жилы и оболочки.

Проведение эксперимента

Установка состоит из моделирующей части (электроды модели, повторяющие форму жилы и оболочки кабеля в масштабе 10:1, проводящая бумага, резиновая подложка, источник питания) и измерительной части (электронный вольтметр, мультиметр, измерительный резистор, зонд).

Аналогия полей позволяет по измеренной в поле проводящей бумаги для модели кабеля проводимости на единицу длины G_0 [См/м] определить емкость на единицу длины C_0 [Ф/м] кабеля той же геометрии (положения жилы и оболочки, отношения их радиусов).

Так, если емкость кабеля длиной l определяется выражением

$$C = C_0 l = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \frac{R_2}{R_1}},$$

то проводимости G и G_0 его аналоговой модели выражением

$$G = \frac{2\pi\gamma l}{\ln \frac{R'_2}{R'_1}}, \quad G_0 = \frac{G}{l}.$$

В лабораторной аналоговой модели $l = d_{\text{бум}}$, где $d_{\text{бум}}$ – толщина бумаги, меняющаяся в зависимости от условий и времени её хранения, т.е.

$$G = \frac{2\pi\gamma d_{\text{бум}}}{\ln \frac{R'_2}{R'_1}}, \quad G_0 = \frac{G}{l}.$$

Удельная проводимость бумаги γ меняется со временем, т.к. зависит от температуры, влажности, давления. Поэтому входящую в формулу проводимость $\gamma d_{\text{бум}}$ необходимо определить в ходе эксперимента. Это можно сделать, например, измерив омметром сопротивление утечки $R_{\text{ум}} = 1/G$ в аналоговой модели и определив $\gamma d_{\text{бум}}$ из найденного значения.

При моделировании для упрощения можно считать, что $\gamma d_{\text{бум}}$ численно равна удельной объемной проводимости γ_s проводящего вещества бумаги, то есть $\gamma d_{\text{бум}} = \gamma_s \cdot (1 \text{ м})$ ($d_{\text{бум}}$ – в метрах). Тогда I и G модели численно равны соответственно I_0 и G_0 кабеля с проводящей изоляцией с удельной объемной проводимостью γ_s . Ток утечки I_0 определяют по напряжению на измерительном резисторе $R_{\text{изм}} = 1 \text{ Ом}$. Таким образом, достаточно определить I_0 , чтобы рассчитать $G_0 = \frac{I_0}{U}$. Для проведения моделирования необходимо рассчитать γ_s проводящего вещества бумаги (примерное значение $\gamma_s \approx 2,23 \cdot 10^{-3} \text{ 1/Ом}\cdot\text{м}$), далее по результатам экспериментальных данных определить емкость кабеля как $C_0 = G_0 \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{\gamma_s}$.

Точки равного потенциала можно найти, проводя измерения с помощью вольтметра и одноштырькового зонда. Средняя напряженность электрического поля рассчитывается по формуле $E = \frac{\Delta\varphi}{\Delta l} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\Delta l}$, где φ_1 и φ_2 – потенциалы ближайших эквипотенциалей, Δl – кратчайшее расстояние между ними.

Замечание. Измерения следует проводить, обеспечивая максимальный контакт электродов с проводящей бумагой (конструкция электродов это обеспечивает).

Подготовка к работе

В работе исследуется высоковольтный кабель с геометрическими размерами $R_1 = 3$ мм, $R_2 = 15,75$ мм (отношение $R_2/R_1 = 5,25$), диэлектрическая проницаемость изоляции которого ϵ_r, ϵ_0 , при заданном смещении осей жилы и оболочки d . Допустимая напряженность поля $E_{\text{доп}}$ и рабочее напряжение кабеля U выбираются по табл. 2 в зависимости от варианта (номер бригады).

1. Полагая, что смещение геометрических осей отсутствует ($d=0$), рассчитать емкость на единицу длины коаксиального кабеля. Определить напряженность на поверхности жилы и оболочки при напряжении между ними $U = 1$ кВ. Рассчитать максимально допустимое напряжение U_{max} . Построить зависимость $\varphi(r)$ и модуля $E(r)$, где r – расстояние от центра жилы до исследуемой точки поля. Рассчитать численное значение E_M и E_P [В/м].
2. Определить расположение электрических осей при заданном d – смещении геометрических осей. Сделать соответствующий рисунок с изображением геометрических и электрических осей, указав расстояния согласно рис. 2. Рассчитать емкость на единицу длины коаксиального кабеля со смещением жилы. Вычислить модули напряженности в точках М, N, Р и Q при $U = 1$ кВ. Рассчитать максимально допустимое напряжение U_{max} .
3. Сравнить результаты расчета п.1 и п.2.
4. Начертить рабочую схему для проведения моделирования поля кабеля полем в проводящей бумаге. Написать формулу для определения γ , и емкости кабеля по результатам эксперимента.

Таблица 2

№ бригады	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
d , мм	4	5	6	7	8	9	9	8	7	6	5	4
ε_r	6	5	4	4	5	6	4	6	6	6	4	5
$E_{\text{доп}}$, кВ/см	100	150	200	200	150	100	200	100	100	100	200	150

Вопросы для допуска студентов к работе.

1. Каковы цели и методы исследования? Почему исследование поля проводится на моделях, а не на реальных объектах?
2. Какова последовательность выполнения лабораторной работы?
3. В чем состоят и каковы условия формальной аналогии электростатического поля и электрического поля постоянных токов? Запишите уравнения связи параметров этих полей.
4. Как на основе данных физического эксперимента определяется емкость кабеля?
5. Как рассчитать погонную емкость кабеля со смещенной жилой?
6. Качественно изобразить картину поля (силовые линии и эквипотенциали) для кабеля со смещенной жилой.
7. Объясните, почему силовые линии напряженности поля и линии равного потенциала пересекаются под прямым углом.
8. Объясните, почему силовые линии напряженности электростатического поля нормальны к поверхности проводящих тел.
9. Как рассчитать максимально допустимое напряжение кабеля со смещенной жилой?
10. Построить зависимость $E_x(x)$ и $\varphi(x)$ на оси X для кабеля со смещенной жилой, приняв потенциал оболочки кабеля равным нулю.
11. Построить зависимость $E_x(x)$ и $\varphi(x)$ на оси X для кабеля со смещенной жилой, приняв потенциал оболочки кабеля равным нулю.
12. Построить зависимости $E_y(y)$ и $\varphi(y)$ вдоль оси, проходящей через центр жилы (при $x = -S_1$).
13. Построить зависимости $E_y(y)$ и $\varphi(y)$ вдоль оси, проходящей через центр оболочки (при $x = -S_2$).
14. Провести эквипотенциаль (силовую линию) через заданную точку.

15. Какие данные об объекте моделирования необходимы для компьютерного моделирования? Чем ограничивается точность моделирования поля при использовании учебной версии программы расчета полей.

Рабочее задание

Модель кабеля 10:1 (размеры цилиндрических электродов $R_1 = 30$ мм и $R_2 = 157,5$ мм, $d = d_{\text{табличное}} \cdot 10$). В качестве источника взять регулируемый источник постоянного напряжения из блока МОДУЛЬ ПИТАНИЯ **UZ4**, в качестве измерительного сопротивления выбрать резистор, обозначенный на стенде как $R_1 = 1$ Ом. Измерить сопротивление резистора $R_{\text{изм}}$ с помощью мультиметра.

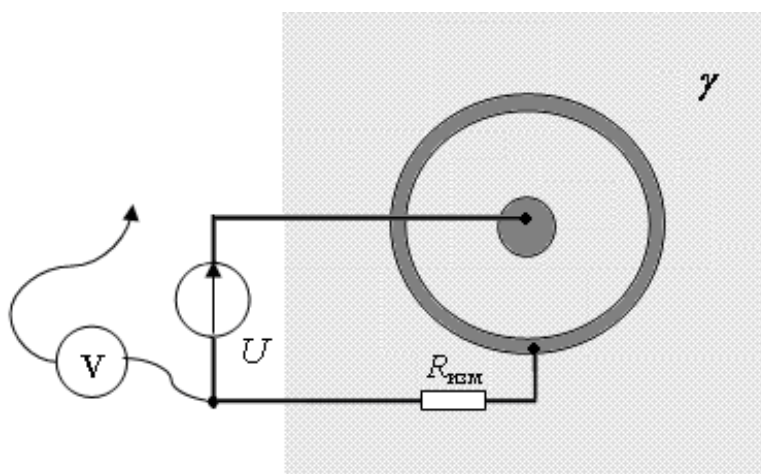


Рис. 3

1. Установить на листе проводящей бумаги электроды в соответствии с заданной геометрией коаксиального кабеля (без смещения жилы $d=0$). С помощью мультиметра при выключенном источнике питания в режиме измерения сопротивления измерить сопротивление утечки между установленными электродами $R_{\text{ут}}$. Рассчитать проводимость модели $G = 1/R_{\text{ут}}$.
2. Собрать цепь для измерения тока утечки I (рис. 3). **ВНИМАНИЕ! Во избежание короткого замыкания не передвигать электроды при включенном источнике.** Включить источник **UZ4**. С помощью мультиметра в режиме измерения постоянного напряжения установить напряжение $U=10$ В между электродами. Определить ток I в схеме, по результатам измерения напряжения на измерительном резисторе $R_{\text{изм}}$. Найти проводимость $G = I/U$. Сравнить полученное значение проводимости со значением, рассчитанным в п.1 Рабочего задания.

3. Принять численное равенство $G_0 = G$, определить γ_0 проводящей бумаги и емкость C_0 коаксиального кабеля. C_0 сравнить со значением, рассчитанным в п.1 Подготовки к работе.
4. Отметить на проводящей бумаге контуры электродов. Нарисовать схему для определения точек равного потенциала. Провести эквипотенциали, соответствующие 20, 40, 60 и 80 % от приложенного напряжения.
5. Провести необходимые измерения $\Delta\varphi$ для точек М и Р для расчета напряженности в этих точках. Рассчитать напряженность в точках М (на поверхности жилы) и Р (на поверхности оболочки) по формуле $E = \frac{\Delta\varphi}{\Delta l} \cdot \frac{k_U}{k_l}$, где k_U - отношение рабочих напряжений модели и кабеля напряжений, k_l - отношение линейных размеров объекта моделирования и модели, $\Delta l \approx 0,5$ см. Сравнить полученные значения напряженностей со значениями напряженностей, рассчитанными в п. 2 Подготовки к работе.
6. Установить на листе проводящей бумаги электроды в соответствии с заданной геометрией коаксиального кабеля (со смещением оси жилы d) и измерить ток утечки I . Выполнив измерения, рассчитать проводимость G_0 системы. Определить емкость C_0 коаксиального кабеля со смещением жилы (считая γ_0 известным), сравнить со значением, рассчитанным в п.3 Подготовки к работе.
7. Провести необходимые измерения $\Delta\varphi$ для точек М, N, Р и Q для расчета напряженности в этих точках. Сравнить полученные значения напряженностей со значениями напряженностей, рассчитанными в п. 3 Подготовке к работе.
8. Отметить на проводящей бумаге контуры электродов. Провести эквипотенциали, соответствующие 20, 40, 60 и 80 % от приложенного напряжения.
9. Дополнить картину эквипотенциалей п. 4 и п. 8 силовыми линиями.

Протокол измерений к работе №1П.

Сопротивление измерительного резистора $R_{\text{изм}} = \underline{\hspace{2cm}}$ Ом.

№ опыта	$R_{\text{ут}}$, Ом	$G = 1/R_{\text{ут}}$, См
1		

Экспериментальное определение емкости кабеля без смещения жилы

№ опыта	U, В	$U_{R_{\text{изм}}}$, В	I_0 , А/м	G_0 , [См/м]
2				

$\gamma_3 = \underline{\hspace{2cm}}$ См/м;

$C_{0\text{эксп}} = \underline{\hspace{2cm}}$ Ф/м;

$C_{0\text{теор}} = \underline{\hspace{2cm}}$ Ф/м

Исследование картины поля кабеля без смещения жилы

№ опыта	U, В	$\Delta\phi$ для точки М	$\Delta\phi$ для точки Р
5			

$\Delta l = \underline{\hspace{2cm}}$ м, $k_U = \underline{\hspace{2cm}}$, $k_I = \underline{\hspace{2cm}}$

$E_{M\text{эксп}} = \underline{\hspace{2cm}}$ В/м;

$E_{M\text{теор}} = \underline{\hspace{2cm}}$ В/м;

$E_{P\text{эксп}} = \underline{\hspace{2cm}}$ В/м;

$E_{P\text{теор}} = \underline{\hspace{2cm}}$ В/м.

Экспериментальное определение емкости кабеля со смещением жилы ($d = \underline{\hspace{1cm}}$)

№ опыта	U, В	$U_{R_{\text{изм}}}$, В	I_0 , А/м	G_0 , [См/м]
6				

$C_{0\text{эксп}} = \underline{\hspace{2cm}}$ Ф/м;

$C_{0\text{теор}} = \underline{\hspace{2cm}}$ Ф/м

Исследование картины поля кабеля со смещением жилы

№ опыта	U, В	$\Delta\phi$ для точки М	$\Delta\phi$ для точки Р	$\Delta\phi$ для точки N	$\Delta\phi$ для точки Q
7					

$\Delta l = \underline{\hspace{2cm}}$ м, $k_U = \underline{\hspace{2cm}}$, $k_I = \underline{\hspace{2cm}}$

$$E_{M_{\text{эсп}}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В/м}; \quad E_{M_{\text{теор}}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В/м};$$

$$E_{P_{\text{эсп}}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В/м}; \quad E_{P_{\text{теор}}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В/м};$$

$$E_{N_{\text{эсп}}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В/м}; \quad E_{N_{\text{теор}}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В/м};$$

$$E_{Q_{\text{эсп}}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В/м}; \quad E_{Q_{\text{теор}}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В/м};$$

Компьютерное моделирование

Коаксиальный кабель

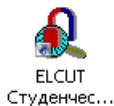
По заданному напряжению U , диэлектрической проницаемости $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$ и геометрическим размерам r_1, r_2 коаксиального кабеля построить картину поля.

Кабель со смещенной жилой

Осуществить моделирование поля и расчет емкости кабеля по аналогии с п. 1 предыдущего случая - кабеля без смещения жилы.

Методические указания к компьютерному моделированию

1. Создать на рабочем столе папку, с названием соответствующем номеру Вашей учебной группы. В дальнейшем все выполняемые на компьютере задания рекомендуется сохранять в этой папке.
2. Открыть программу **ELCUT Студенческий** двойным щелчком мыши по ярлыку



программы на рабочем столе

3. Создать новый файл командой **Файл/Создать/Задача ELCUT** или двойным щелчком по пиктограмме 

4. Задать имя новой задачи, в дальнейшем присваивать это же имя всем файлам в рамках одной задачи. Нажать клавишу **Обзор** и указать путь к созданной Вами папке.


5. Задать характер исследуемого поля – электростатическое, класс модели – плоская, расчет – обычный, единицы длины – сантиметры, система координат – декартовы координаты.


6. Приступить к построению геометрической модели поля коаксиального кабеля при помощи команды **Файл/Создать/Геометрическая модель**.


7. Задать геометрию окружностей оболочки и жилы кабеля. Задать 4 вершины на

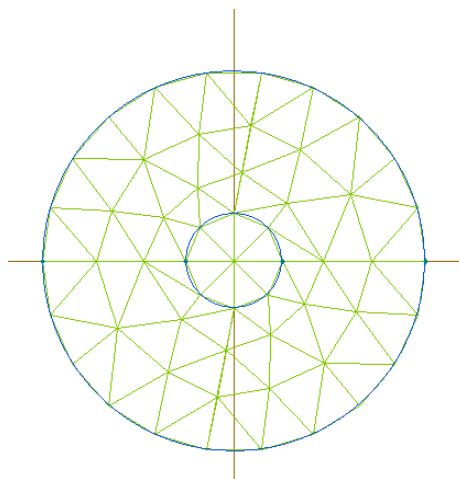
диаметрах жилы и оболочки - точки М, N, Р, Q с помощью пиктограммы 

(**Вставка вершин/ребер**). Выбрать команду **Добавить вершины** щелчком правой

клавиши мыши по рабочему полю. Задать координаты 4 вершин $x=-R_1, y=0$; $x=R_1, y=0$; $x=-R_2, y=0$; $x=R_2, y=0$ (вводить уточненные, измеренные в лаборатории, размеры модели). Изменить масштаб, чтобы на экране были видны все 4 точки. Выбрать в верхней командной строке команду **Половина круга**, соединить точки на диаметрах окружностей, не отпуская клавишу мыши, при этом должна быть активна пиктограмма .

8. Описать построенную модель с помощью меток при помощи пиктограммы . Выделение объекта производится двойным щелчком по объекту. Присвоить метку 1 – жиле кабеля (метка 1 присваивается и верхней и нижней частям окружности), метку 2 – диэлектрику между жилой и оболочкой кабеля, метку 3 – оболочке кабеля (метка 3 присваивается и верхней и нижней частям окружности).
9. В левом окне раскрыть строку **Физические свойства**, щелкнуть правой клавишей мыши по строке **Метки блоков**, выбрать команду **Создать метку**. Создать метку 2. Аналогично ввести метки ребер - 1 и 3.
10. Описать свойства блока 2, двойным щелчком по метке 2 раскрыть диалоговое окно. Задать диэлектрическую проницаемость – ϵ_r . Описать свойства ребер - жилы ($U=10$ В) и оболочки ($U=0$).
11. Построить расчетную сетку. Щелкнуть правой клавишей мыши по блоку 2 на геометрической модели, выбрать команду **Сетка привязки**. Выбрать шаг 0,01 м.

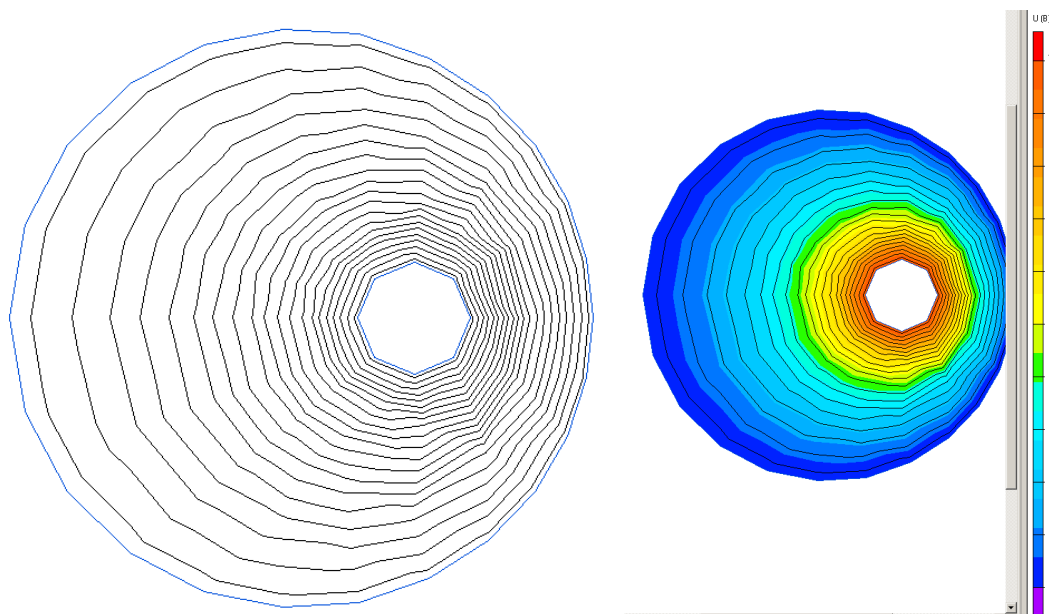
Построить сетку щелчком по пиктограмме .



12. Сохранить задачи командой **Файл/Сохранить как** присвоив ему имя заданное в п. 3.
13. Решить задачу командой **Задача/Решить**. В качестве результатов расчета вывести картину поля с нанесенными векторами напряженности, цветную картину поля с

указанием цветовой шкалы. Для этого щелкнуть правой клавишей мыши по области решения задачи, выбрать опцию картина поля. Определить значения напряженностей в точка М, N, P, Q, для этого щелкнуть правой клавишей мыши по полю решения задачи, выбрать команду локальные значения, указать поочередно точки, выписать значения напряженностей, сравнить со значениями, полученными в результате физического моделирования.

14. Самостоятельно смоделировать кабель со смещенной жилой.



Вопросы для защиты лабораторной работы.

1. Сравните результаты теоретического расчета погонной емкости коаксиального кабеля и результаты эксперимента.
2. Сравните результаты теоретического расчета погонной емкости коаксиального кабеля со смещенной жилой и результаты эксперимента.
3. Для коаксиального кабеля рассчитать радиус эквипотенциали, соответствующей 20 (40, 60, 80) % от приложенного напряжения. Измерить примерный радиус соответствующей эквипотенциали п. 4 Рабочего задания. Сравнить результаты.
4. Для кабеля со смещенной жилой рассчитать радиус R_0 и положение центра X_0 на оси X эквипотенциалей, соответствующих 20 (40, 60, 80) % от приложенного напряжения. Измерить примерный радиус и положение центра соответствующей эквипотенциали п. 8 Рабочего задания. Сравнить результаты.
5. Построить зависимость $\varphi(x)$ на оси X для кабеля со смещенной жилой при $\varphi_p = 0$, для сравнения нанести на график экспериментальные данные, полученные при исследовании картины поля кабеля.

6. Построить зависимость $E_x(x)$ на оси X для кабеля со смещенной жилой при $\varphi_p = 0$, для сравнения нанести на график экспериментальные данные, полученные при исследовании картины поля кабеля.
7. Построить экспериментальную зависимости $\varphi(y)$ вдоль оси, проходящей через центр жилы (при $x = -S_1$) при $\varphi_p = 0$, для сравнения нанести на график экспериментальные данные, полученные при исследовании картины поля кабеля.
8. Построить зависимости $E_y(y)$ и $\varphi(y)$ вдоль оси, проходящей через центр оболочки (при $x = -S_2$) при $\varphi_p = 0$, для сравнения нанести на график экспериментальные данные, полученные при исследовании картины поля кабеля.
9. Дополнить картину поля п. 4 силовыми линиями так, чтобы ячейки сетки, образованной линиями напряженности и линиями равного потенциала были приблизительно подобны друг другу. Рассчитать ток утечки через электрод малого радиуса, используя картину поля и значение γ_3 . Сравнить расчет с результатами эксперимента.
10. Дополнить картину поля п. 8 силовыми линиями так, чтобы ячейки сетки, образованной линиями напряженности и линиями равного потенциала были приблизительно подобны друг другу. Рассчитать ток утечки через электрод малого радиуса, используя картину поля и значение γ_3 . Сравнить расчет с результатами эксперимента.

Литература

К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. Теоретические основы электротехники. Т.3. СПб. Питер, 2003.