

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ



КАФЕДРА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Лабораторная работа № 2П

Моделирование поля системы проводящих заряженных тел

Выполнил:	
Группа:	
Проверил:	

Москва 2019

Лабораторная работа № 2П

Моделирование поля системы проводящих заряженных тел

Цель работы

Физическое и математическое (компьютерное) моделирование электростатических полей воздушных и кабельных линий электропередачи. Определение емкостей и частичных емкостей этих объектов, сравнение результатов моделирования с данными расчета емкостей по аналитическим выражениям.

Ключевые слова: линия электропередачи, провод, кабель, электростатическое поле, потенциал, потенциальные коэффициенты, коэффициенты электростатической индукции, емкость, частичные емкости.

Теоретическая справка

Задача моделирования - создание физических и компьютерных моделей кабелей и систем параллельных длинных проводов, определение емкостей и частичных емкостей этих объектов и выявление факторов, влияющих на параметры этих объектов. В работе физическое моделирование осуществляется для двухпроводной линии и двухпроводной линии над землей. Для трехжильного кабеля проводится физическое и компьютерное моделирование.

Двухпроводная линия - система двух длинных параллельных проводов радиусом r_0 и d - расстоянием между геометрическими осями этих проводов (рис. 1,а). При точном расчете поля системы параллельных цилиндрических проводов необходимо учитывать, что заряд распределен по поверхности проводов неравномерно, плотность заряда больше в точках, расположенных максимально близко друг к другу ("эффект близости"). Расчет поля проводится с использованием следствия теоремы существования и единственности решения уравнений поля. Поле линии электропередачи вне сечения проводов совпадает с полем двух линейных проводов $\pm\tau$, оси которых, называемые электрическими осями проводов, не совпадают с геометрическими осями проводов (рис. 1,б). Справедливо следующее соотношение между координатами электрических $(\mp a, 0)$ и геометрических

$(\mp \frac{d}{2}, 0)$ осей: $a = \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - r_0^2}$. Емкость воздушной двухпроводной линии на единицу

длины $C_0 = \frac{\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{d}{2r_0} + \sqrt{\frac{d^2}{4r_0^2} - 1}\right)}$. Если $d \gg r_0$, то неравномерностью распределения заряда по поверхности можно пренебречь, считая положение геометрических и электрических

осей совпадающими, то есть полагая $d = 2a$. В таком случае погонная емкость двухпроводной линии рассчитывается по формуле $C_0 \approx \frac{\pi\epsilon_0}{\ln \frac{d}{r_0}}$, потенциал в любой точке

поля (вне сечения проводов) определяют по формуле $\varphi = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r^-}{r^+} + K$, где r^- , r^+ - расстояние от точки наблюдения поля до геометрических осей (центров) проводов. При $\varphi(0) = 0$ константа $K = 0$. Линейная плотность заряда $\tau = C_0 U$, где U - напряжение между проводами.

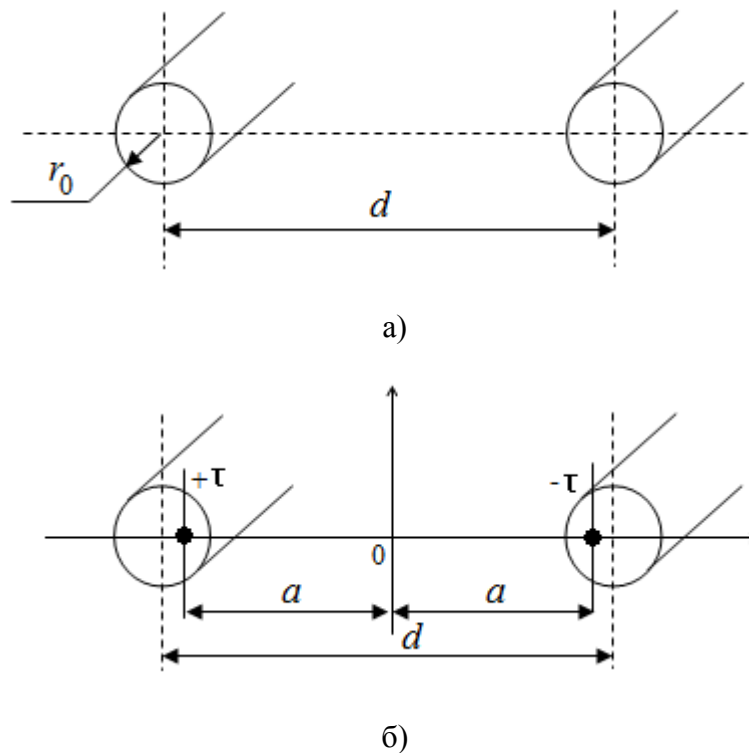


Рис. 1. Двухпроводная линия: d - расстояние между геометрическими осями, $2a$ - расстояние между электрическими осями.

Для системы длинных n -параллельных заряженных проводов, считая распределение заряда на поверхности проводов равномерным как вне, так и в присутствии остальных заряженных тел, на основании принципа суперпозиции потенциал в любой точке A (вне проводов) можно представить как сумму потенциалов, обусловленных каждой системой в отдельности:

$$\varphi_A = \varphi_{A1} + \varphi_{A2} + \dots + \varphi_{An},$$

причем каждая составляющая пропорциональна соответствующему заряду системы:

$$\varphi_{A1} = \alpha_{A1} \cdot \tau_1; \varphi_{A2} = \alpha_{A2} \cdot \tau_2; \dots; \varphi_{An} = \alpha_{An} \cdot \tau_n.$$

Полагая, что точка А расположена сначала на проводе 1, затем на проводе 2 и т.д., для системы n -заряженных проводов $(\pm\tau_1, \pm\tau_2, \dots, \pm\tau_n)$ получаем формулы Максвелла с потенциальными коэффициентами α_{ik} :

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= \alpha_{11}\tau_1 + \alpha_{12}\tau_2 + \dots + \alpha_{1n}\tau_n \\ \varphi_2 &= \alpha_{21}\tau_1 + \alpha_{22}\tau_2 + \dots + \alpha_{2n}\tau_n \\ &\vdots \\ \varphi_n &= \alpha_{n1}\tau_1 + \alpha_{n2}\tau_2 + \dots + \alpha_{nn}\tau_n\end{aligned}\quad (1)$$

Система уравнений (1) позволяет решить задачу о распределении потенциалов в системе проводов, если известны их линейные заряды и коэффициенты α_{ik} . Потенциальные коэффициенты α_{ik} зависят от формы и размеров проводящих тел, их взаимного расположения и от ε_r - диэлектрической проницаемости среды.

Нередко возникает обратная задача: известны потенциалы проводов, требуется найти их линейные заряды. Решая (1) относительно зарядов, получим:

$$\begin{aligned}\tau_1 &= \beta_{11}\varphi_1 + \beta_{12}\varphi_2 + \dots + \beta_{1n}\varphi_n \\ \tau_2 &= \beta_{21}\varphi_1 + \beta_{22}\varphi_2 + \dots + \beta_{2n}\varphi_n \\ &\vdots \\ \tau_n &= \beta_{n1}\varphi_1 + \beta_{n2}\varphi_2 + \dots + \beta_{nn}\varphi_n\end{aligned}\quad (2)$$

Коэффициенты β_{ik} называют коэффициентами электростатической индукции, они имеют размерность погонной емкости и поэтому называются также емкостные коэффициенты, собственные β_{ii} и взаимные β_{ik} . На практике собственный коэффициент электростатической индукции β_{ii} может быть найден, если принять, что потенциалы всех проводов, кроме i -го провода, равны нулю. Тогда $\tau_i = \beta_{ii} \cdot \varphi_i$, если $\varphi_i \neq 0$, $\varphi_k = 0$, $k \neq i$. Взаимный коэффициент электростатической индукции β_{ik} определяется из опыта $\tau_i = \beta_{ik} \cdot \varphi_k$, если $\varphi_k \neq 0$, $\varphi_i = 0$, $i \neq k$. При этом $\beta_{ii} > 0$, $\beta_{ik} < 0$.

Наиболее важной является форма записи уравнений, в которой заряд каждого тела выражается не через потенциалы тел, а через разность потенциалов данного тела и других тел, в том числе Земли ($\varphi_0 = 0$):

$$\begin{aligned}\tau_1 &= C_{11}(\varphi_1 - \varphi_0) + C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) + \dots + C_{1n}(\varphi_1 - \varphi_n) \\ \tau_2 &= C_{21}(\varphi_2 - \varphi_1) + C_{22}(\varphi_2 - \varphi_0) + \dots + C_{2n}(\varphi_2 - \varphi_n) \\ &\vdots \\ \tau_n &= C_{n1}(\varphi_n - \varphi_1) + C_{n2}(\varphi_n - \varphi_2) + \dots + C_{nn}(\varphi_n - \varphi_0)\end{aligned}\quad (3)$$

Коэффициенты в уравнениях (3) называются частичными емкостями. Различают собственные C_{ii} и взаимные C_{ik} частичные емкости. Имея схему включения частичных

емкостей, можно выразить заряд каждого провода через потенциалы. Все частичные емкости положительны и могут быть определены через коэффициенты электростатической индукции:

$$\begin{aligned} C_{ii} &= \beta_{i1} + \beta_{i2} + \dots + \beta_{in} \\ C_{ik} &= -\beta_{ik} \end{aligned}$$

В соответствии с принципом взаимности $\alpha_{ik} = \alpha_{ki}$, $\beta_{ik} = \beta_{ki}$, $C_{ik} = C_{ki}$.

На рис. 2 изображено сечение **трехжильного кабеля** и собственные и взаимные частичные емкости трехжильного кабеля. Для трехжильного кабеля, полагая потенциал оболочки кабеля равным φ_0 , система уравнений с частичными емкостями (на единицу длины) имеет вид:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= C_{11}(\varphi_1 - \varphi_0) + C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) + C_{13}(\varphi_1 - \varphi_3) \\ \tau_2 &= C_{21}(\varphi_2 - \varphi_1) + C_{22}(\varphi_2 - \varphi_0) + C_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) \\ \tau_3 &= C_{31}(\varphi_3 - \varphi_1) + C_{32}(\varphi_3 - \varphi_2) + C_{33}(\varphi_3 - \varphi_0) \end{aligned}$$

Система трехжильного кабеля является симметричной, т.е. $C_{11} = C_{22} = C_{33}$ и $C_{12} = C_{13} = C_{23}$.

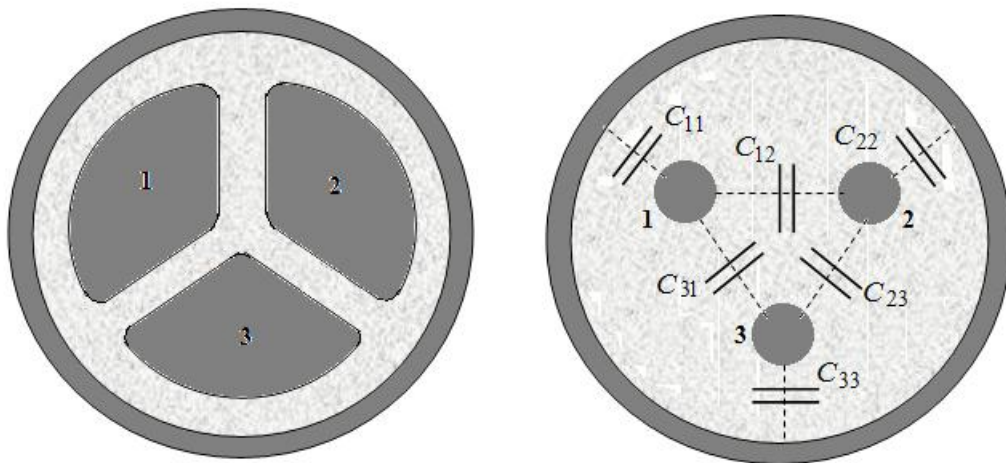


Рис.2. Трехжильный кабель

На рис. 3,а изображена **двухпроводная линия над Землей**. Пусть τ_1 - заряд первого провода на единицу длины, τ_2 - заряд второго провода на единицу длины, r_0 - радиус проводов. Задана высота подвеса каждого провода h_1 , h_2 и d - расстояние между проводами. Расчет поля двухпроводной линии над землей решается *методом зеркальных изображений* (следствие теоремы единственности решения) и совпадает с полем двух двухпроводных линий $(\pm\tau_1)$ $(\pm\tau_2)$, расположенных зеркально относительно друг друга (Рис. 3,б) для области вне проводов и в верхней полуплоскости.

Для двухпроводной линии потенциалы на поверхности проводов могут быть выражены через потенциальные коэффициенты:

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= \alpha_{11}\tau_1 + \alpha_{12}\tau_2 \\ \varphi_2 &= \alpha_{21}\tau_1 + \alpha_{22}\tau_2.\end{aligned}$$

Потенциальные коэффициенты определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}\varphi_1|_{\tau_2=0} &= \frac{\tau_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_1}{r_0}, \Rightarrow \alpha_{11} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_1}{r_0}; \\ \varphi_2|_{\tau_1=0} &= \frac{\tau_2}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_2}{r_0}, \Rightarrow \alpha_{22} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_2}{r_0}.\end{aligned}$$

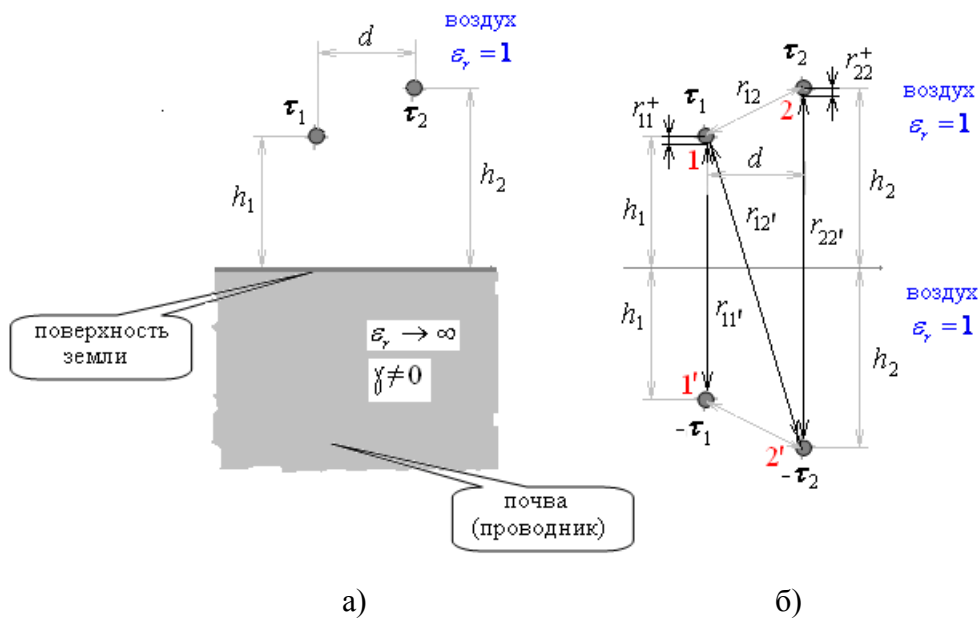


Рис. 3. Двухпроводная линия над землей

Потенциал 1-го провода, обусловленный полем 2-го провода и его зеркальным изображением при отсутствии заряда на 1-м проводе определяется как

$$\varphi_1|_{\tau_1=0} = \frac{\tau_2}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_{12}'}{r_{12}}, \text{ следовательно } \alpha_{12} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_{12}'}{r_{12}}; \text{ аналогично } \alpha_{21} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_{21}'}{r_{21}}.$$

Расстояния r_{21} , r_{12}' , r_{21}' рассчитываются по заданным h_1 , h_2 и d .

Если $h_1 = h_2 = h$, то потенциальные коэффициенты $\alpha_{11} = \alpha_{22} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h}{r_0}$,

$$\alpha_{12} = \alpha_{21} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{\sqrt{(2h)^2 + d^2}}{d}.$$

Для системы проводов, не имеющих гальваническую связь с Землей ($\tau_1 + \tau_2 = 0$) можно определить рабочую емкость на единицу длины (погонную емкость)

$$C_{\text{раб}} = \frac{\tau_1}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{1}{\alpha_{11} + \alpha_{22} - 2\alpha_{12}} \text{ [Ф/м]}.$$

При равенстве $h_1 = h_2 = h$ погонная емкость $C_{\text{раб}} = \frac{1}{2(\alpha_{11} - \alpha_{12})} = \frac{\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{2h}{r_0} \cdot \frac{d}{\sqrt{(2h)^2 + d^2}}\right)}$.

Уравнения с частичными емкостями для двухпроводной линии над Землей имеют вид:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= C_{11}(\varphi_1 - \varphi_0) + C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) \\ \tau_2 &= C_{21}(\varphi_2 - \varphi_1) + C_{22}(\varphi_2 - \varphi_0) \end{aligned}$$

Делая перегруппировку членов в уравнениях с частичными емкостями с учетом $\varphi_0 = 0$, получаем

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \underbrace{(C_{11} + C_{12})}_{\beta_{11}} \varphi_1 - \underbrace{C_{12}}_{\beta_{12}} \varphi_2 \\ \tau_2 &= -\underbrace{C_{21}}_{\beta_{21}} \varphi_1 + \underbrace{(C_{21} + C_{22})}_{\beta_{22}} \varphi_2 \end{aligned}$$

Таким образом, $C_{12} = -\beta_{12}$, $C_{21} = -\beta_{21}$, $C_{11} = \beta_{11} - C_{12} = \beta_{11} + \beta_{12}$, $C_{22} = \beta_{22} - C_{21} = \beta_{22} + \beta_{21}$.

Рабочая емкость в таком случае может быть представлена как эквивалентная емкость трех частичных емкостей $C_{\text{раб}} = C_{12} + \frac{C_{11}C_{22}}{C_{11} + C_{22}}$ (Рис. 4):

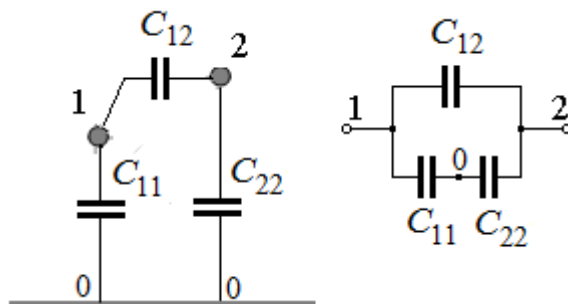


Рис. 4. Схема подсоединения частичных емкостей при расчете емкости двухпроводной линии с учетом влияния Земли

Метод зеркальных изображений в общем случае может быть применен для расчета поля n -проводной линии над Землей.

Подготовка к работе

1. Рассчитать погонную емкость двухпроводной линии с учетом и без учета смещения электрических осей (Рис.1). Геометрические размеры заданы в Таблице 1 и выбираются по номеру бригады. Найти относительную погрешность определения C_0 .
2. Рассчитать рабочую емкость, потенциальные коэффициенты α_{ij} , коэффициенты электростатической индукции β_{ij} и частичные емкости C_{ij} , ($i, j = 1, 2$) на единицу длины двухпроводной линии с учетом влияния земли (Рис. 3). Геометрические размеры заданы в Таблице 1. При расчете пренебречь неравномерностью распределения зарядов по поверхности проводов.

Таблица 1

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
d , мм	100	110	115	90	105	95	100	110	115	90	105	95
r_0 , мм	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
$h_1 = h_2 = h$, мм	170	170	170	170	170	170	150	150	150	150	150	150

3. Нарисовать измерительные схемы для определения частичных проводимостей системы двухпроводной линии. Записать формулу для расчета частичных емкостей через частичные проводимости, рабочей емкости на единицу длины.
4. Нарисовать измерительные схемы для определения частичных проводимостей трехжильного кабеля. Записать формулу для расчета частичных емкостей через частичные проводимости, зарядов каждой жилы на единицу длины.

Вопросы для допуска студентов к работе

1. Какова последовательность выполнения лабораторной работы?
2. Какова взаимосвязь зарядов и потенциалов тел, выраженная через:
 - потенциальные коэффициенты,
 - коэффициенты электростатической индукции,
 - частичные емкости.
3. Какие граничные условия должны быть выполнены при исследовании поля двухпроводной линии (Рис. 1)? Какие граничные условия выполняются в поле физической модели? Качественно изобразите картину поля. Каково положение плоскости нулевого потенциала?

4. Какие граничные условия должны быть выполнены при исследовании поля двухпроводной линии над Землей (Рис. 3)? Какие граничные условия выполняются в поле физической модели? Качественно изобразите картину поля. Каково положение плоскости нулевого потенциала?
5. Может ли электрическая ось провода располагаться вне его сечения? Как учесть смещение электрических осей при расчете поля двухпроводной линии над Землей? Изменяется ли расстояние между геометрической и электрической осями провода при изменении высоты его подвеса над поверхностью Земли?
6. Запишите систему с потенциальными коэффициентами для трехпроводной воздушной линии над землей. Как определить потенциальные коэффициенты этой системы? Возможно ли выполнение соотношений $C_{11} = C_{22} = C_{33}$; $C_{12} = C_{23} = C_{31}$?
7. При каком условии выполняется соотношение $C_{11} = C_{22} = C_{33}$ и $C_{12} = C_{23} = C_{31}$ для трехжильного кабеля?
8. Какие данные необходимы для компьютерного расчета коэффициентов электростатической индукции и частичных емкостей трехфазного кабеля.

Параметры физических аналоговых моделей

Провода моделируются металлическими цилиндрами диаметра $2r_0 = 3$ мм. Расстояние между цилиндрами, моделирующими провода, $d = 100$ мм. Расстояние между цилиндрами и металлическим бруском, моделирующим поверхность земли, $h = 170$ мм.

Рабочее задание

Физическое моделирование:

1. Установить в центре листа проводящей бумаги электроды в соответствии с заданной геометрией двухпроводной линии (Таблица 1). Собрать схему для измерения проводимости G_0 системы (Рис. 5). В качестве $R_{\text{изм}} = 1$ Ом выбрать резистор из модуля РЕЗИСТОРЫ И РЕАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ. Измерить сопротивление резистора с помощью мультиметра в режиме измерения сопротивления. В дальнейшем в расчетах использовать измеренное значение сопротивления $R_{\text{изм}}$. В качестве источника взять регулируемый источник постоянного напряжения из блока МОДУЛЬ ПИТАНИЯ **UZ4**. Установить с помощью мультиметра в режиме измерения постоянного напряжения $U = 10$ В.

Измерить напряжение на резисторе $R_{\text{изм}}$, определить ток в цепи I , рассчитать проводимость модели $G = I/U$. Принять $G = G_0$ и определить по найденному значению емкость C_0 . При расчете емкостей и частичных емкостей принять $\gamma = 2,5 \cdot 10^{-3}$ См/м ($\gamma = \gamma_3$,

полученной в работе №1П). Сравнить полученное значение со значением, рассчитанным в п.1 Подготовки к работе.

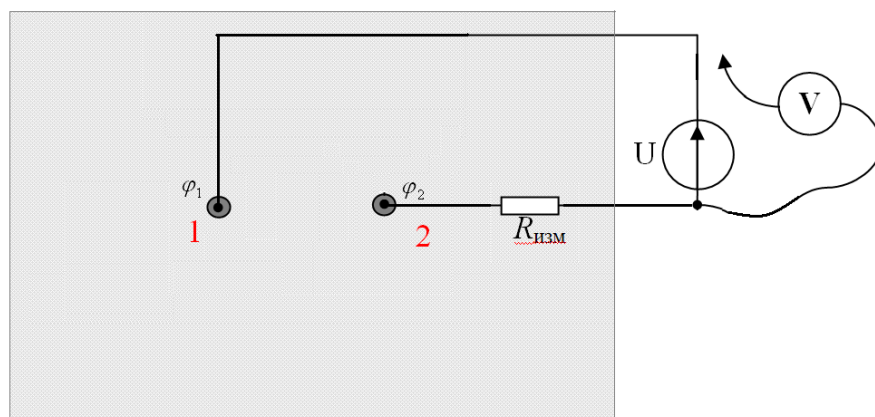
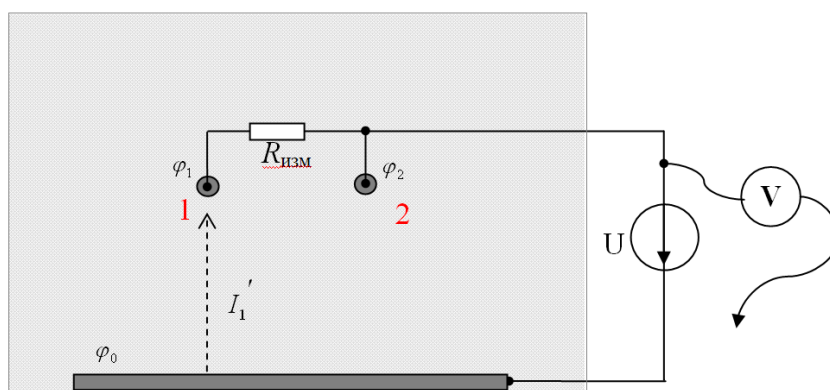


Рис. 5

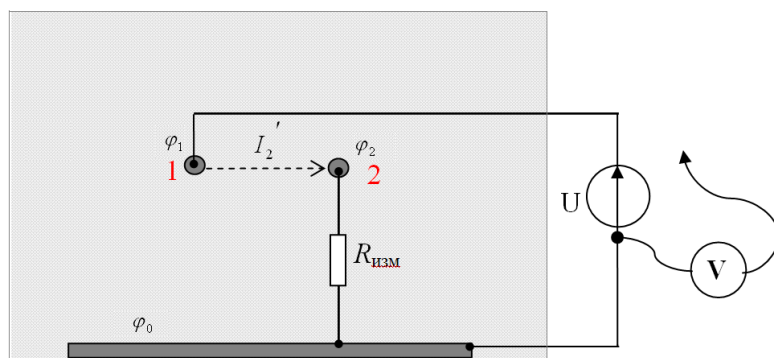
2. Установить на листе проводящей бумаги электроды в соответствии с заданной геометрией двухпроводной линии над землей (Таблица 1), для этого дополнительно установить на бумаге вплотную к ее кромке два электрода-бруска, моделирующих землю. Электроды необходимо вплотную сдвинуть концами друг к другу и соединить между собой проводом. По методике, изложенной в п.1, измерить ток цепи I , рассчитать проводимость модели $G=I/U$. Принять $G=G_0$ и определить по найденному значению емкость C_0 с учетом влияния земли. Сравнить значения емкостей, полученные в п.1 и п.2 Рабочего задания.

Собрать схемы для измерения частичных токов и определения частичных проводимостей системы (Рис. 6 а, б). Выполнив измерения частичных токов (по напряжению на $R_{изм}$), рассчитать частичные проводимости G_{ij} , ($i, j=1,2$) модели, по ним определить частичные емкости C_{ij} , ($i, j=1,2$). Сравнить полученные значения со значениями, рассчитанными в п.2 Подготовки к работе.



$$\varphi_1 = \varphi_2 = 0, \quad \varphi_0 = U; \quad I_1' = G_{11}U$$

а) измерительная схема для определения G_{11}

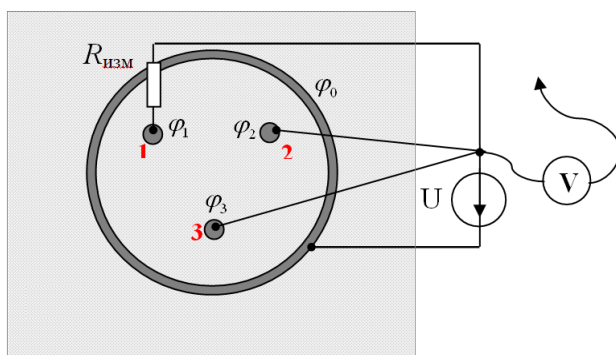


$$\varphi_2 = \varphi_0 = 0, \varphi_1 = U; I_2' = -G_{21}U$$

б) измерительная схема для определения G_{12}

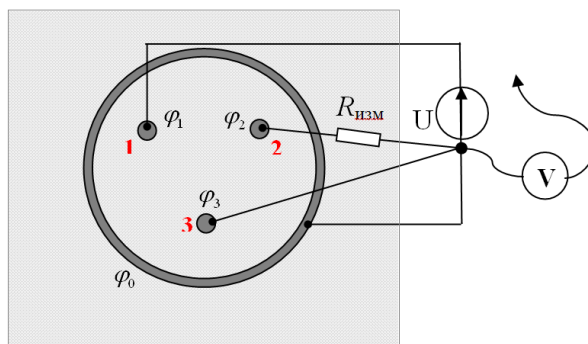
Рис. 6

3. Установить на листе проводящей бумаги электроды в соответствии с геометрией трехжильного кабеля (Рис. 7). В соответствии с измерительными схемами Рис.6 а, б, в определить частичные проводимости на единицу длины трехжильного кабеля. По результатам эксперимента определить частичные емкости C_{ij} на единицу длины кабеля, связывающие его потенциалы $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ и линейные плотности зарядов проводов τ_1, τ_2, τ_3 .



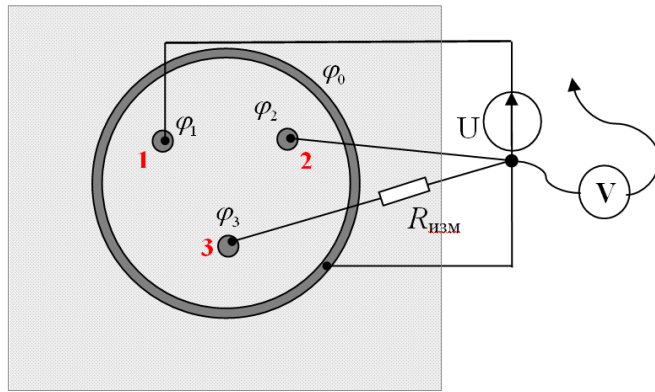
$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = 0, \varphi_0 = U; I_1' = G_{11}U.$$

а) измерительная схема для определения собственной проводимости G_{11}



$$\varphi_2 = \varphi_3 = \varphi_0 = 0, \varphi_1 = U; I_2' = G_{21}U.$$

б) измерительная схема для определения проводимости $G_{21} = G_{12}$



$$\varphi_3 = \varphi_2 = \varphi_0 = 0, \varphi_1 = U; I_3' = G_{31}U.$$

в) измерительная схема для определения проводимости $G_{31} = G_{13}$

Рис. 7

4. Снять эквипотенциали поля трехжильного кабеля при условии, что $\varphi_1 = 10$ В, $\varphi_2 = \varphi_3 = 0$ В (Рис. 8), соответствующие 20%, 40%, 60%, 80% от приложенного напряжения.

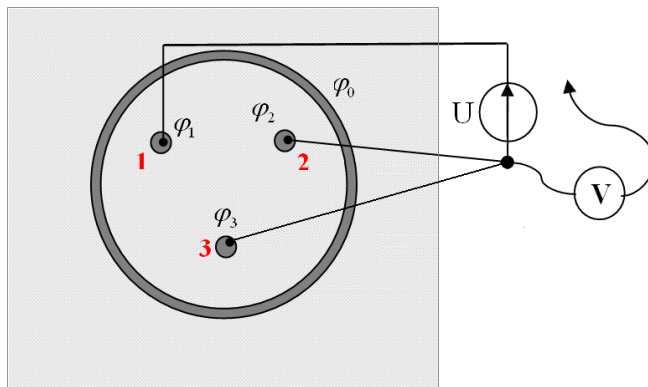


Рис. 8.

Дополнить картину эквипотенциалей силовыми линиями. Измерить и записать потенциал электрода, моделирующего оболочку кабеля φ_0 в этом эксперименте.

Протокол измерений к работе №2П.

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

№ опыта	U, В	U _{Ризм} , В	I', А/м	G ₀ , [См/м]
1				

$C_0 \text{ эксп} = \underline{\hspace{2cm}}$ Ф/м $C_0 \text{ теор} = \underline{\hspace{2cm}}$ Ф/м

№ опыта	U, В	U _{Ризм} , В	I' ₁ , А/м	G ₁₁ , [См/м]
2а				
№ опыта	U, В	U _{Ризм} , В	I' ₂ , А/м	G ₁₂ = G ₂₁ , [См/м]
2б				


$C_{11} \text{ эксп} = \underline{\hspace{2cm}}$ Ф/м $C_{11} \text{ теор} = \underline{\hspace{2cm}}$ Ф/м

$C_{12} \text{ эксп} = \underline{\hspace{2cm}}$ Ф/м $C_{12} \text{ теор} = \underline{\hspace{2cm}}$ Ф/м

№ опыта	U, В	U _{Ризм} , В	I' ₁ , А/м	G ₁₁ = G ₂₂ , [См/м]	C ₁₁ = C ₂₂ , [Ф/м]
3а					
№ опыта	U, В	U _{Ризм} , В	I' ₂ , А/м	G ₁₂ = G ₂₁ , [См/м]	C ₁₂ = C ₂₁ , [Ф/м]
3б					
№ опыта	U, В	U _{Ризм} , В	I' ₃ , А/м	G ₁₃ = G ₃₁ , [См/м]	C ₁₃ = C ₃₁ , [Ф/м]
3в					

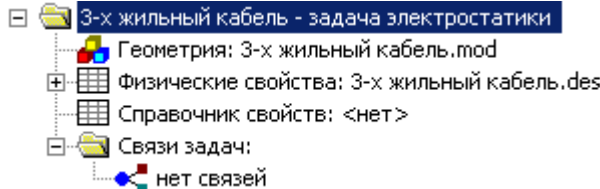
№ опыта	φ ₁ , В	φ ₂ , В	φ ₃ , В	φ ₀ , В
4				

Моделирование 3-х жильного кабеля в ELCUT


1. Вызов программы ELCUT.
2. В меню «Файл» кнопкой  создать «новый документ» - ОК
3. Щелчком на поле *Задача ELCUT* – готово- ОК
4. В поле «Создание задачи» - ввести имя файла – «3-х жильный кабель»
5. Осуществить Выбор папки – *Обзор*- (для последующей записи своих файлов) «далее»
6. Выбрать *Тип задачи* – «Электростатическое поле»- *Расчет*- «Обычный» - Класс модели «Плоская» - далее
7. Выбор системы координат –«Единицы длины» (см или мм) – Декартовы координаты – Готово, Сохранить файл описания задачи.

Замечание: Решения ELCUT допустимы для ограниченных областей с замкнутыми границами (экраном) плоскопараллельных и осесимметричных конфигураций. В нашей задаче внутренняя поверхность проводника оболочки ограничивает область поля кабеля

Выбор команд можно осуществить из всплывающего меню с помощью нажатия ПКМ на соответствующем поле окна.

8. В левом окне «Меню» *3-х жильный кабель* (появляется в левом окне)


Дважды щелчком ЛКМ на строке «Геометрия» *Создать файл геометрии* – ОК (справа появится окно для построения геометрии на размеченном в клетку поле)

9. Кнопкой из строки инструментов  осуществляем команду - «вставка вершин и ребер» Щелчок дважды ЛКМ- создание *вершины* (синяя точка), протяжка – создание *ребра* (прямой линии), ввод двух вершин- диаметр *окружности* (или из двух полуокружностей), имитирующие линии металлических тел или границ раздела сред.. Имеется возможность вызова окружности и прямоугольника из команды «Добавить фигуру» (Рис. 9)

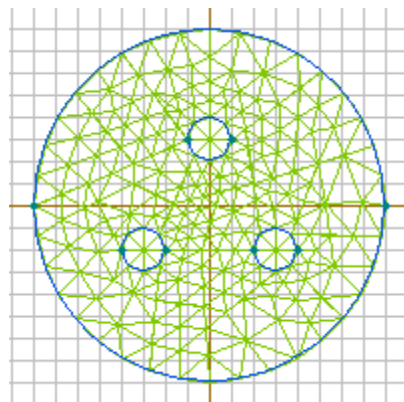







Рис. 9.

8. Кнопкой  в командной строке выделяются и удаляются нежелательные объекты (вершины, ребра, окружности)

9. Щелчком ЛКМ в левом окне на выделенных объектах устанавливаем метки (названия или числа) для соответствующих объектов геометрии.
10. В меню *3-х жильный кабель* (в левом окне) щелчком ЛКМ на строке «Физические свойства» выделяем метками частичные блоки кабеля (области изоляции и 3-х жил по отдельности) и устанавливаем в всплывшем окне значение относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r , в блоке изоляции – требуемое значение, а в блоках жил значение 10^6 или более (имитация идеального проводника жилы, электрическое поле внутри которого отсутствует)
11. На метках ребер, вершин выделяем их отдельно щелчком ЛКМ и устанавливаем значения потенциалов (или зарядов) на выделенных объектах (например, «0» Вольт на 2-ой и 3-ей жиле и заданное значение «U» – на 1-ой жиле).. Оболочке присвоить значение *Нейтральный электрод*.
12. Кнопкой  устанавливаем сетку в выделенных блоках. С помощью кнопки  осуществляется удаление сетки. Сохранить построенную модель командой «Сохранить все файлы».
В случае превышения допустимого числа ячеек сетки (255) следует уменьшить размеры объекта, повторно установив метки и их значения.
13. В строке «Задача» выбираем команду «Решить» (или кнопку *решить*  и *увидеть результаты* ). Решение представляется в виде картины распределения эквипотенциалей, а в строке «Вид» устанавливаем по выбору вектора напряженности или электрического смещения как на Рис. 10.

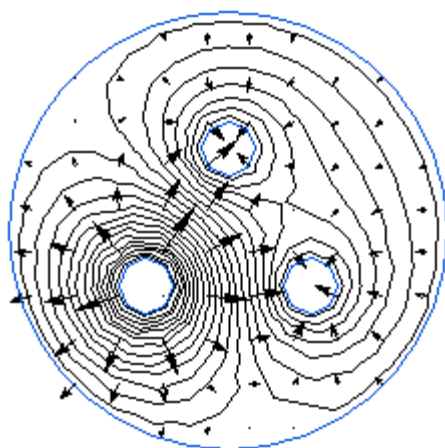


Рис. 10

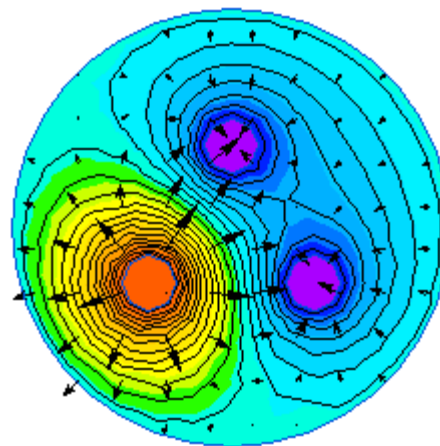


Рис. 11

14. В строке «Вид» выбираем «Картина поля» и в сплывающем меню выбираем «Вектора поля» и наблюдаем распределение напряженности (или смещения) электрического поля. При выборе «Цвет» наблюдаем распределение интенсивность электрического поля в цветах (от синего до красного).
Картина векторов напряженности электрического поля, цветом указаны значения потенциалов Рис. 11.
15. Для определения заряда на первой жиле кабеля в строке «Контур» выбираем «полуокружность» (две частичные линии дают окружность) и при нажатой ЛКМ охватываем замкнутым контуром электрод жилы, как показано ниже. Дополнительно, при необходимости, в строке «Контур» можно выбрать команду «Замкнуть» (см. Рис. 12)

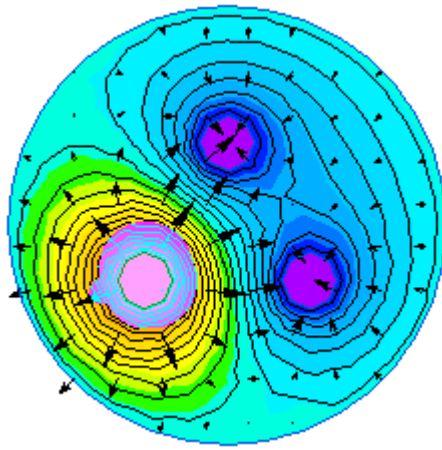


Рис. 12

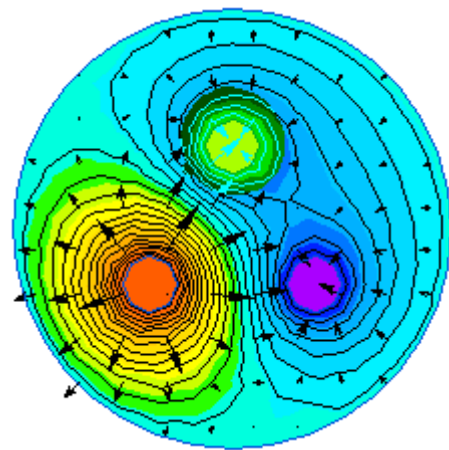


Рис.13

16. В строке «Вид» выбираем «Интегральные параметры» и в перечисленных в всплывающем меню параметрах выбираем «Заряд» или другие интересующие параметры. Линейный заряд первой жилы примера $Q_1=2.39e-8$ Кл/м. Аналогично определяем заряды на второй жиле (Рис. 13.) и на третьей жиле. Значения зарядов составили $Q_2=-1.278e-8$ Кл/м, $Q_3=1.269e-8$ Кл/м.

Для расчета собственных и взаимных частичных емкостей трехжильного кабеля необходимо составить систему уравнений с частичными емкостями. Пользуясь полученными значениями зарядов и напряжений на трех жилах рассчитать частичные емкости.

17. В строке Контур выбираем *Добавить полуокружность* и строим замкнутый контур по внутренней поверхности оболочки кабеля для получения графиков распределения нормальной составляющей вектора смещения и, следовательно, для распределения плотности поверхностного заряда на оболочке (Рис. 14 и Рис. 15).

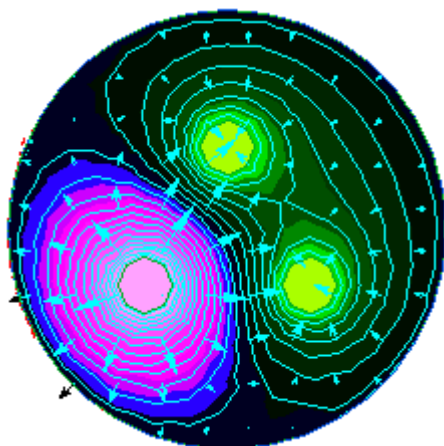


Рис. 14

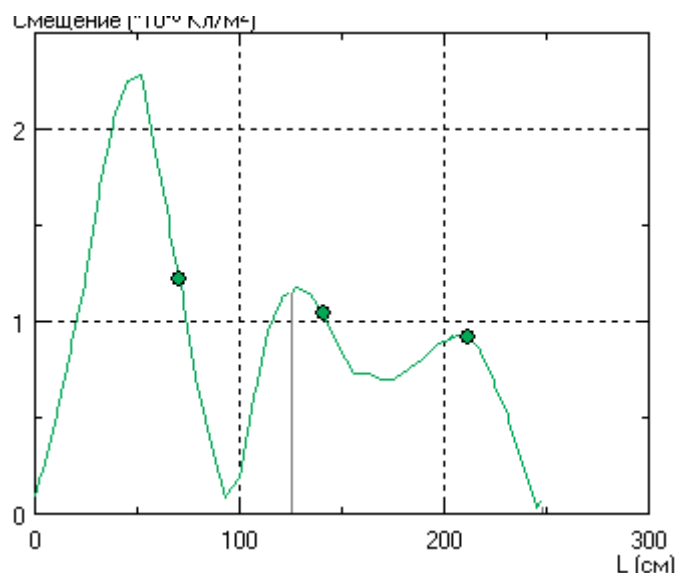


Рис. 15

18. Для представления графиков в строке «Контур» выбираем «прямую линию» в качестве оси ординат графика и накладываем ее протяжкой на интересующую область исследуемого объекта. Нажатием ЛКМ в поле «Вид» на строке «Графики» наблюдаем полученные зависимости (распределение потенциала, напряженности,

смещения и др.) Например, по прямой, проходящей симметрично через центр 1-ой жилы (Рис. 16, Рис. 17, Рис. 18).

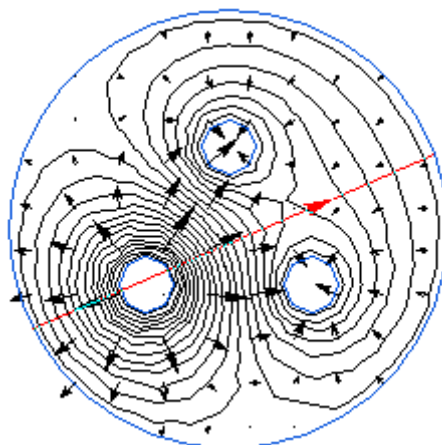


Рис. 16

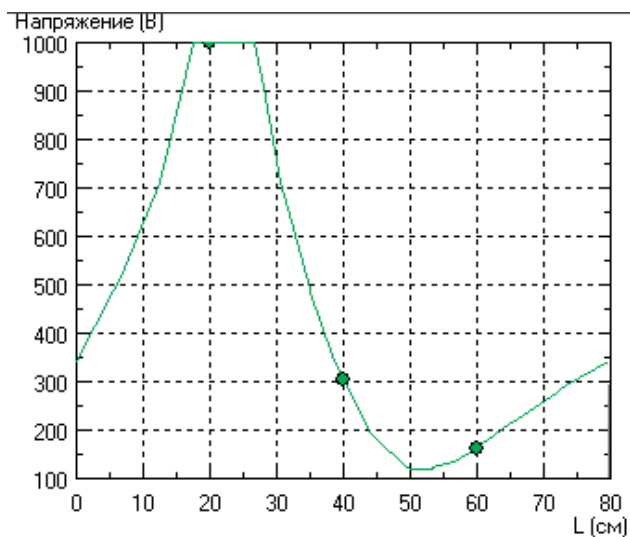


Рис. 17.

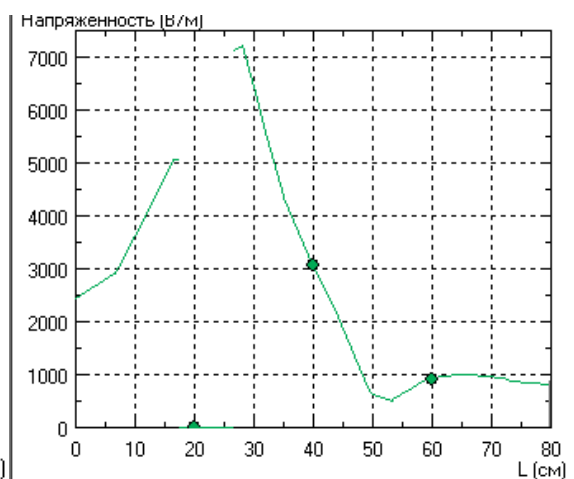



Рис. 18

Из графика рис. 17 следует: $U_{\text{оболочки}} = 350 \text{ В}$, $U_1 = 1000 \text{ В}$, при выборе $U_2 = U_3 = 0$. Из графика рис. 18 следует, что в области первой жилы вектор напряженности равен нулю (идеализированный проводник).

19. С помощью кнопки  сохранить все файлы задачи в ранее выбранной папке.
 20. Сравнить расчетные зависимости и интегральные параметры исследуемых объектов с полученными результатами по программе ELCUT.
- Основные результаты моделирования приложить к отчету по лабораторной работе.

Вопросы для защиты лабораторной работы.

1. Определить погонную емкость двухпроводной линии над Землей с заданным радиусом $r_0 = 15$ мм и расстоянием между геометрическими осями $d = 100$ мм с учетом и без учета смещения электрических осей.
2. Определить рабочую емкость двухпроводной линии радиусом $r_0 = 15$ мм, расстоянием между геометрическими осями $d = 100$ мм, находящейся на расстоянии $h = 170$ мм над плоской проводящей поверхностью. При расчете пренебречь смещением электрических осей.
3. Используя экспериментально определенные частичные проводимости системы цилиндров над плоской проводящей поверхностью (п. 2 Рабочего задания) и разность потенциалов между цилиндрами, определить ток утечки I (на единицу длины) в этой системе.
4. Используя экспериментально определенные частичные проводимости трехжильного кабеля (п. 3 Рабочего задания) и известные потенциалы электродов, моделирующих жилы и оболочку (п. 4 Рабочего задания), определить токи утечки I_1, I_2, I_3 (на единицу длины).
5. Используя построенную картину поля трехжильного кабеля, рассчитать ток утечки, прошедший через электрод, имеющий больший потенциал ($\varphi_1 = 10$ В).
6. Как измениться картина поля трехжильного кабеля, если принять $\varphi_1 = 0$ В, $\varphi_2 = \varphi_3 = 10$ В?

Литература

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