

Лабораторна робота № 62

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ДВОПРОВІДНОЇ ЛІНІЇ ПОЛЕМ СТРУМУ В ПРОВІДНИКОВОМУ ЛИСТІ

Мета роботи

Ознайомлення з принципами моделювання електричних і магнітних полів.

З'ясування аналогії між картинами електричного поля струму в провідному середовищі та електричного поля в діелектрику.

Ознайомлення з методикою побудови картини електричного поля двох-провідної лінії.

Підготовка до роботи

Готуючись до роботи, необхідно:

Ознайомитися з робочим завданням і методичними вказівками.

1. Скласти протокол звіту з лабораторної роботи.
3. Відповісти на наступні питання:
 - а) які величини характеризують електричне поле в діелектрику і електричне поле струму в провідному середовищі?
 - б) за яких умов картини електричного поля в діелектрику і електричного поля в провідному середовищі будуть подібні?
 - в) з якою метою застосовують на практиці моделювання полів?

Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається з плоского круглого залізного листа (листа з провідного паперу), на граничному колі якого розміщені затискачі для підведення і відведення струму (рис. 62.1). Затискачі розміщені парами, кожна пара розташована симетрично відносно середньої діаметральної лінії листа. На лист тим чи іншим способом накладається прямокутна сітка для визначення координат точок на поверхні листа.

До будь-якої з пар затискачів через перемикач Π підводиться постійна напруга і через лист пропускається постійний струм, значення якого задається викладачем. Незмінність струму під час досліду підтримується регульованим реостатом.

Для знаходження дослідним шляхом ліній рівного потенціалу установка містить гальванометр, оснащений провідниками зі щупами.

Порядок виконання роботи

1. Скласти схему згідно рис. 62.1.
2. За допомогою гальванометра знайти екіпотенціальні лінії з різницею потенціалів між двома сусідніми лініями 5–10 поділок гальванометра і накреслити їх на сталюму листі крейдою. Одну з екіпотенціальних ліній сумістити з середньою діаметральною лінією листа, щоб картина поля була симетричною відносно неї.

3. Перемалювати отримані криві в протокол звіту на шаблони провідного листа з нанесеною масштабною сіткою, зображені на рис. 62.2 та 62.3.

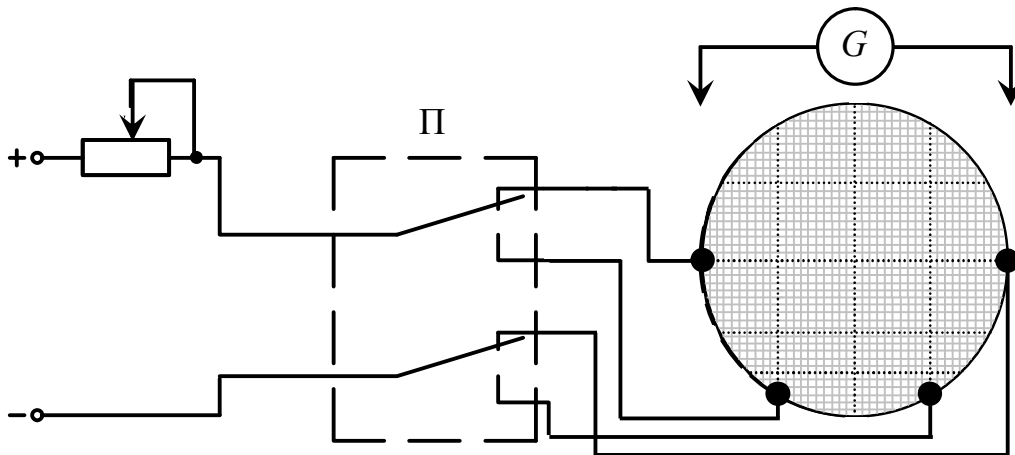


Рис. 62.1

Обробка результатів експерименту

1. Виконати розрахунок даних для побудови теоретичної картини поля.
2. На картину поля, нанесену на шаблони, накласти розраховану теоретично картину поля: лінії рівного потенціалу і лінії струму.
3. Зробити і записати в протокол звіту висновки з виконаної роботи.

Методичні вказівки

Поряд з теоретичним розрахунком і безпосереднім експериментальним дослідженням електричних полів велике практичне значення має дослідження цих полів шляхом моделювання.

В основу моделювання покладено той факт, що багато полів описуються подібними за структурою рівняннями. Наприклад, постійне електричне поле в діелектрику за відсутності об'ємних зарядів і постійне електричне поле у провідному середовищі в області поза джерелами ЕРС описуються аналогічними рівняннями:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \bar{E} = 0 \left(\bar{E} = -\overline{\operatorname{grad} V} \right); \quad \bar{D} = \varepsilon \bar{E}; \quad \operatorname{div} \bar{D} = 0; \\ \operatorname{rot} \bar{E} = 0 \left(\bar{E} = -\overline{\operatorname{grad} V} \right); \quad \bar{\delta} = \gamma \bar{E}; \quad \operatorname{div} \bar{\delta} = 0, \end{aligned} \quad (62.1)$$

де \bar{E} – напруженість електричного поля; \bar{D} – вектор електричного зміщення в електростатичному полі; ε – абсолютна діелектрична проникність, що характеризує діелектричні властивості діелектрика, скалярна для ізотропної речовини; $\bar{\delta}$ – вектор щільності електричного струму в провідному середовищі; V – потенціал електричного поля; γ – питома електрична провідність, що характеризує електропровідність речовини, скалярна для ізотропного середовища.

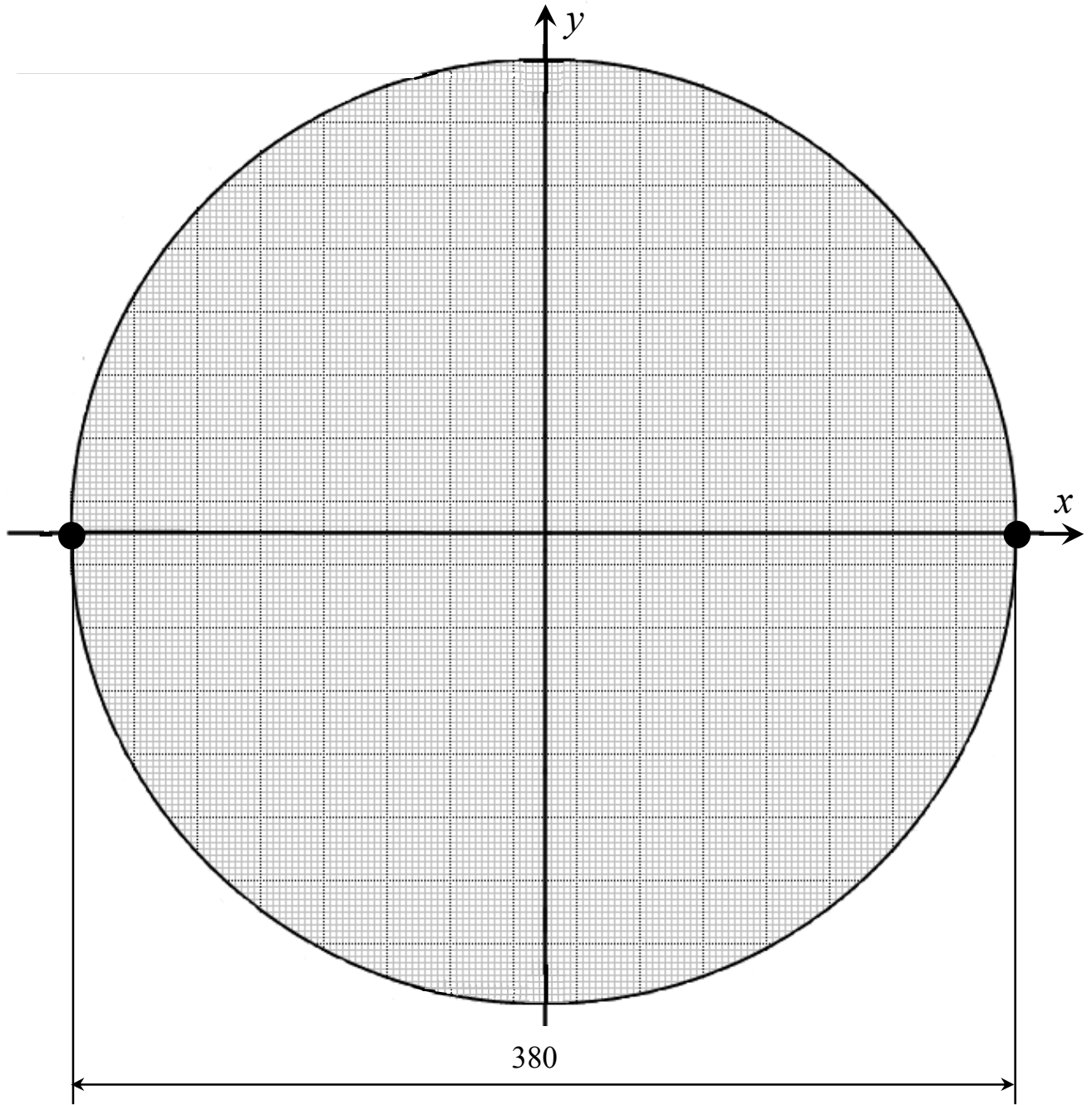


Рис 62.2

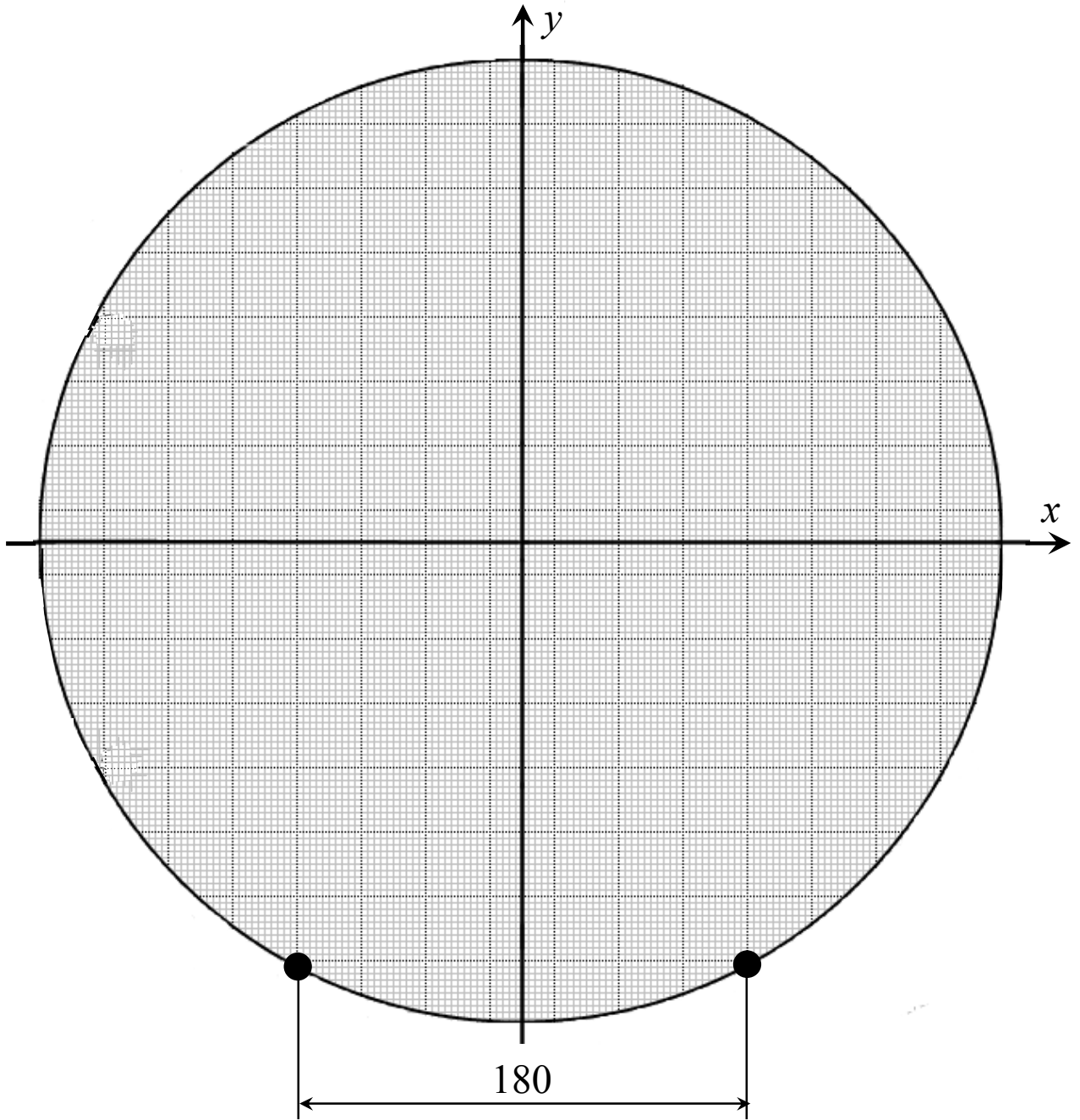


Рис 62.3

Тому, якщо однакові геометричні конфігурації областей простору, в яких існують ці поля, якщо аналогічні граничні умови на границях областей і подібні відносні розподілення значень ε і γ всередині областей, то картини цих полів будуть подібні.

З рівнянь (62.1) випливає, що вектору \overline{D} електростатичного поля формально аналогічний вектор $\overline{\delta}$ електричного поля струму в провідному середовищі, а величині ε – величина γ .

Як відомо, на границі розділу двох середовищ з різною діелектричною проникністю залишаються незмінними нормальні складові вектора \overline{D} і дотичні складові вектора \overline{E} . Аналогічно на границі розділу двох середовищ з різною питомою провідністю залишаються незмінними нормальні складові вектора $\overline{\delta}$ і дотичні складові вектора \overline{E} .

Крім того, в електричному полі провідне тіло, що несе заряд, граничить з діелектриком поверхнею рівного потенціалу і, отже, вектор \overline{D} до неї нормальний. У разі протікання струму в середовищі з відносно малою питомою провідністю можна знехтувати падінням напруги всередині провідного тіла з високою питомою провідністю і вважати поверхню останнього еквіпотенціальною (вектор $\overline{\delta}$ буде до неї нормальним).

Геометричну подібність областей, в яких існують поля, забезпечують шляхом вибору відповідної конфігурації провідного листа і електродів для підведення струму. У разі однорідного і ізотропного матеріалу провідного листа, вимога аналогічного розподілу значень ε і γ виконується автоматично.

Встановлена аналогія рівнянь і граничних умов дозволяє замінити дослідження електростатичного поля експериментальним дослідженням поля струму в провідному середовищі і навпаки.

Для дослідження плоско-паралельних полів використовуються металеві листи або листи з провідного паперу, вирізані за певною формою, що зображує область досліджуваного поля. Для дослідження як плоско-паралельних, так і просторових полів, широко використовується метод моделювання в електrolітичній ванні.

У лабораторній роботі двопровідна лінія подана двома циліндричними нескінченно довгими паралельними електродами, відстань між якими у багато разів більша від їх діаметра. Електроди виготовлені з міді і мають досить велику питому провідність, вони оточені середовищем (сталевий лист), питома провідність якого багато менша провідності електродів. За наявності напруги між електродами картина електричного поля струму в середовищі, що оточує електроди, збігається з картиною електричного поля в діелектрику, що оточує заряджену двопровідну лінію передачі.

У відповідності із тим, що відомо з теорії про картину електричного поля двопровідної лінії [1], можна стверджувати, що лінії струму в провідному се-

редовищі будуть колами, що проходять через електричні осі електродів, а лінії однакового потенціалу в площинах, перпендикулярних до осей електродів, утворюють родинку ексцентричних кіл з центрами на прямій, що проходить через осі електродів. Оскільки діаметри перетинів електродів малі у порівнянні з відстанню між ними, електричні осі практично збігаються з геометричними осями електродів.

Для дослідження такого поля досить із середовища з малою електропровідністю вирізати його частину, обмежену з усіх боків лініями струму. Саме такою частиною є досліджуваний круглий плоский залізний лист. Граничне коло листа, як кордон провідного середовища, утворено лініями струму.

Плоскі поверхні листа відповідають двом площинам, які перпендикулярні до нескінченно довгих паралельних провідників лінії передачі. Лінії напруженості електричного поля лінії передачі паралельні до цих площин. Бокова циліндрична поверхня листа відповідає циліндричним поверхням, утвореним в електростатичному полі лінії передачі лініями напруженості, які є дугами кіл однакового радіуса.

Дослід полягає в тому, щоб отримати на залізному листі (на провідному папері) родину ліній рівного потенціалу. З цією метою модель приєднують до джерела постійного струму, значення якого підтримують незмінним за допомогою регульованого реостата. Для отримання симетричного розміщення екіпотенціальних кривих за початкову точку вибирають центр круга. Дотикаючись одним із щупів, приєднаних до гальванометра, початкової точки, шукають іншим щупом ще декілька точок рівного потенціалу (гальванометр в цих точках не повинен давати відхилення). Об'єднуючи між собою знайдені точки, отримують початкову екіпотенціальну лінію.

Задавши різницю потенціалів між сусідніми екіпотенціальними лініями 5–10 поділок гальванометра, знаходять точки сусідньої екіпотенціальної лінії. Переносять щуп гальванометра на отриману лінію рівного потенціалу і таким же чином визначають точки наступної лінії. Остання лінія рівного потенціалу повинна розташовуватися не ближче 20..30 мм від затискача, що підводить струм до моделі.

В силу симетрії картини поля досить зняти лінії рівного потенціалу тільки на одній половині листа (ліворуч або праворуч від початкової лінії).

Отриману картину ліній однакового потенціалу переносять на лист паперу з допомогою координатної сітки або пантографа. На цей малюнок наносять розраховані теоретичні лінії однакового потенціалу і лінії напруженості.

Лінії однакового потенціалу в такому разі є колами з центрами на прямій, що проходить через центри затискачів, призначених для підведення струму (рис. 62.4).

Відстань центрів цих кіл від середньої прямої лінії рівного потенціалу визначаються за формулою

$$|x_0| = \frac{1+k^2}{|1-k^2|} b. \quad (62.2)$$

Їхні радіуси їх знаходяться з виразу

$$R = \frac{2k}{|1-k^2|} b, \quad (62.3)$$

де b – половина відстані між центрами затискачів для підведення струму (як вказувалося, у такому разі електричні центри збігаються з геометричними).

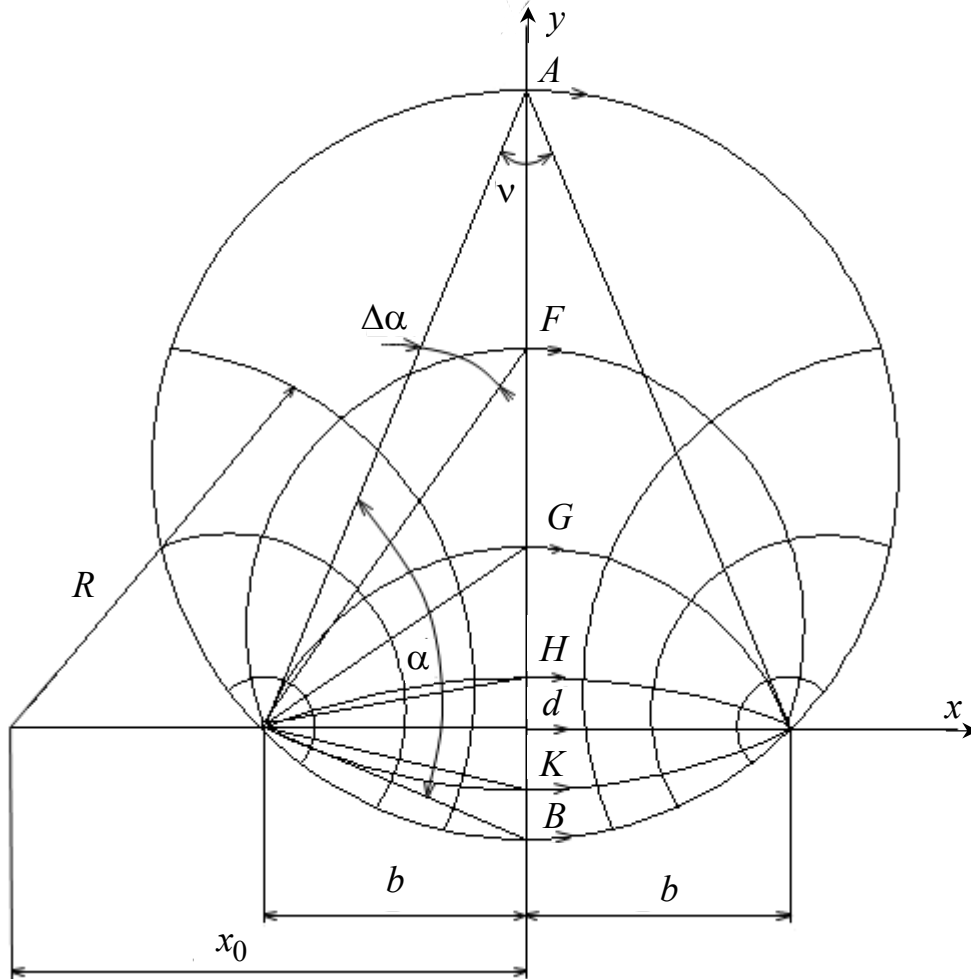


Рис. 62.4

Число k характеризує лінію однакового потенціалу і дорівнює відношенню відстані будь-якої точки цієї лінії до електричних осей провідників. Для середньої лінії, очевидно, $k=1$.

Для кожної лінії, знятої експериментально, визначають величину k у трьох чи п'яти точках цієї лінії і потім усереднюють отримані значення. Щоб приріст потенціалу при переході від будь-якої лінії однакового потенціалу до сусідньої залишався постійним, числа k при зростанні порядкового номера лінії повинні змінюватися в геометричній прогресії:

$$k_{n+1}/k_n = B = \text{const},$$

Тому для кожної пари екіпотенціальних ліній, знятих дослідним шляхом, починаючи від середньої ($k=1$), необхідно визначити значення числа B і

усереднити його. Далі розраховують значення k для кожної теоретичної лінії однакового потенціалу:

$$k_{n+1} = B k_n,$$

Далі за формулами (62.2) і (62.3) визначають координату центру і радіус теоретичного кола лінії однакового потенціалу.

Лінії струму є колами, що проходять через центри затискачів, через які підводиться струм. В електричному полі лінії передачі їм відповідають лінії вектора електричного зміщення. Бажано число трубок струму вибирати таким, щоб середня довжина вічка сітки поля була такою ж, як і ширина.

Нехай ν – кут, під яким видний відрізок, що з'єднує центри затискачів, із точок, що належать зовнішній лінії струму. Щоб лінії струму ділили простір на трубки однакового струму, необхідно побудувати ці лінії одну за одною так, щоб кут ν при переході від кожної лінії до сусідньої збільшувався на одне і те ж значення $\Delta\nu$.

Виконується це таким чином. Із центру одного затискача проводять прямі до діаметра AB (рис. 62.2). Кут α між цими прямими ділять на рівні частини $\Delta\alpha$, кількість яких дорівнює кількості трубок струму. Проводять промені, віддалені один від одного на кут $\Delta\alpha$. Точки перетину цих променів із середньою лінією рівного потенціалу належать шуканим лініям струму.

Питання для самостійної роботи

1. Як можна моделювати електричне поле трижильного кабеля у разі прикладання до його жил трифазної симетричної системи напруг промислової частоти?
2. Який вигляд має електрична схема установки для моделювання електричного поля трижильного кабеля?
3. Якими повинні бути параметри подільника напруги, що забезпечить потрібні значення потенціалів на жилах трижильного кабеля при моделюванні його електричного поля полем струму в листі?

Література

1. Бойко В. С., Бойко В. В., Видолоб Ю. Ф. та ін. Теоретичні основи електротехніки. У 3 т. Т. 3: підручник /– К. : НТУУ "КПІ", 2013. – с. 150–156.
2. Нейман Л.Р., Демірчян К.С., Юрінов В.М. Керівництво до лабораторії електромагнітного поля. -Вища шк., 1966. – с. 173 – 184