

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Запорізький національний технічний університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт з дисципліни
«Теоретичні основи електротехніки» ч. III,
розділ «Теорія електромагнітного поля»

для студентів спеціальності 141 всіх форм навчання

2018

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки» ч. III, розділ «Теорія електромагнітного поля» для студентів спеціальності 141 всіх форм навчання / Укладачі: С.М. Тиховод, О.Г. Волкова, Г.М. Романіченко, І.О. Афанасьєва, О.Л. Пазюк – Запоріжжя: ЗНТУ, 2018, – 30 с.

Укладачі: С.М. Тиховод, доцент, доктор техн. наук;
О.Г. Волкова, доцент, канд. техн. наук;
Г.М. Романіченко, старший викладач;
І.О. Афанасьєва, старший викладач;
О.Л. Пазюк, завідувач лабораторією.

Рецензент: В.Ф. Безотосний, доцент, канд. техн. наук.

Відповідальний
за випуск Г.М. Романіченко, старший викладач.

ЗАТВЕРДЖЕНО
на засіданні кафедри
Теоретичної та загальної електротехніки
Протокол №8 від 04.06.2018 р.

ЗАТВЕРДЖЕНО
на засіданні науково-методичної комісії
електротехнічного факультету
Протокол №11 від 21.06.2018 р.

ЗМІСТ

Передмова	4
1 Лабораторна робота №31. Графічний метод побудови картини поля постійного струму в плоскому провідному листі	5
1.1 Мета роботи	5
1.2 Загальні відомості	5
1.3 Підготовка до роботи	7
1.4 Матеріали, інструменти, прилади, обладнання	8
1.5 Порядок виконання роботи	8
1.6 Обробка результатів досліджень	9
2 Лабораторна робота №32. Моделювання електричного поля двох провідної лінії передачі	10
2.1 Мета роботи	10
2.2 Загальні відомості	10
2.3 Підготовка до роботи	13
2.4 Матеріали, інструменти, прилади, обладнання	13
2.5 Порядок виконання роботи	14
2.6 Обробка результатів досліджень	14
3 Лабораторна робота №33. Дослідження опору заземлення та просторового розтікання електричного струму в провідному середовищі	15
3.1 Мета роботи	15
3.2 Загальні відомості	15
3.3 Підготовка до роботи	19
3.4 Матеріали, інструменти, прилади, обладнання	20
3.5 Порядок виконання роботи	21
3.6 Обробка результатів досліджень	23
4 Лабораторна робота №34. Дослідження магнітного поля циліндричної котушки зі струмом	24
4.1 Мета роботи	24
4.2 Загальні відомості	24
4.3 Підготовка до роботи	28
4.4 Матеріали, інструменти, прилади, обладнання	28
4.5 Порядок виконання роботи	29
4.6 Обробка результатів досліджень	30
5 Рекомендована література	30

ПЕРЕДМОВА

Ці методичні вказівки призначені для кращої підготовки студентів з теоретичних основ електротехніки, раціонального використання часу, призначеного для самостійної роботи, для виконання лабораторних робіт і оформлення звітів.

Методичні вказівки містять у собі інструкції до 4 лабораторних робіт з теорії електромагнітного поля. Кожна з цих робіт містить тему і мету роботи, короткі теоретичні поняття з теми роботи, порядок проведення підготовчої роботи, опису лабораторної установки та робоче завдання, яке треба виконати безпосередньо за робочим стендом. Також наведено вимоги щодо обробки результатів вимірювань і контрольні запитання, які допомагають студентам при підготовці до роботи.

Для успішного виконання і захисту лабораторної роботи за відведений аудиторний час студенту необхідно *підготуватися до неї завчасно*. До обов'язкової підготовки належить:

- вивчення теоретичного матеріалу по курсу лекцій, методичним вказівкам і рекомендованій літературі;
- знати усно відповіді на контрольні запитання;
- знати порядок виконання лабораторної роботи;
- виконати заготовку бланку звіту.

Виконання домашнього розрахункового завдання, яке пропонується в деяких лабораторних роботах не є обов'язковим, але сприяє підвищенню рейтингу студента.

Бланк звіту складається з чотирьох аркушів і повинен вміщати:

- титульний лист звичайного зразка;
- мету роботи, схеми і таблиці з «Робочого завдання»;
- формули для розрахунків важливих параметрів.

Креслення потрібно виконувати олівцем зі застосуванням креслярського приладдя у відповідності до вимог ЄСКД.

Рівень підготовки студента до виконання лабораторної роботи викладач визначає на початку заняття і своїм підписом на титульному аркуші бланку звіту засвідчує допуск до роботи за стендом.

Робота вважається виконаною після того, як викладач перевірів результати вимірювань і зробив відповідну помітку в своєму журналі.

1. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №31 ГРАФІЧНИЙ МЕТОД ПОБУДОВИ КАРТИНИ ПОЛЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ В ПЛОСКОМУ ПРОВІДНОМУ ЛИСТІ

1.1 Мета роботи

Вивчити методику побудови графічної картини плоско паралельного поля на прикладі досліджень розподілу постійного струму в плоскому провідному листі; вирахувати по графічній картині поля повну електричну провідність листа.

1.2 Загальні відомості

1.2.1 Постійний електричний струм в провідному середовищі створює стаціонарні магнітне та електричне поля, які умовно можуть розглядатись незалежно одне від одного. Електричне поле в провідному середовищі по за межами джерела *е.р.с.* та магнітне поле по за межами протікання струмів характеризуються рівняннями Лапласа для потенціалів:

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad \text{та} \quad \nabla^2 \varphi_m = 0 . \quad (1.1)$$

Аналогічним рівнянням характеризується також і поле в діелектриках по за межами заряджених, провідних середовищ.

Умови поля на границі розподілу двох середовищ для електростатичного, електричного та магнітного полів постійних струмів записуються аналогічно. Тому рішення рівняння Лапласа для перелічених полів теж будуть подібними. Результати розрахунків, які одержані для одного поля, можуть бути поширені на інші поля формальною заміною відповідних величин – так званий *принцип аналогії*. Аналогія між величинами в електростатичних полях в діелектриках, в стаціонарних електричних і стаціонарних магнітних полях представлена у Таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Аналогія між відповідними величинами ЕМП

Стаціонарне електричне поле в провідному середовищі	$\vec{E}$	$\vec{D}$	γ	φ	I	U	G
Стаціонарне магнітне поле	$\vec{H}$	$\vec{B}$	μ_a	φ_m	Φ	U_m	G_m
Електростатичне поле в діелектрику	$\vec{E}$	$\vec{D}$	ε_a	φ	q	U	C

1.2.2 В багатьох практичних випадках форма заряджених провідників, їх взаємне розташування або форма провідних середовищ настільки складні, що аналітичні розрахунки поля виявляються неможливими. В цьому випадку застосовують *експериментальний метод* дослідження поля. Зокрема, для плоско паралельного поля в однорідному ізотропному середовищі велике практичне значення має *графічний метод зображення картини поля*, за допомогою якого можна підрахувати повну провідність або ємність між тілами.

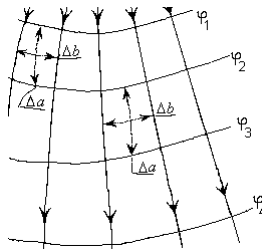


Рисунок 1.1 – Приклад зображення картини плоско паралельного поля

1.2.3 При зображенні картини плоско паралельного поля потрібно дотримуватись наступних правил:

- Лінії напруженості поля та лінії рівного потенціалу повинні перетинатися під прямим кутом.
- Комірки сітки, які утворено лініями напруженості поля та лініями рівного потенціалу, при достатній густині сітки повинні бути приблизно *подібні* одна одній (Рис.1.1).

Отже, для побудови картини поля треба, щоб співвідношення:

$$\frac{\Delta b}{\Delta a} = const , \quad (1.2)$$

де Δb – середній розмір комірки в напрямку лінії рівного потенціалу;

Δa – середній розмір комірки в напрямку лінії напруженості.

- Друге правило відповідає вимозі, щоб приріст потенціалу при переході від будь-якої лінії рівного потенціалу до сусідньої був постійним:

$$\Delta U = const .$$

Тоді поле буде розподілено на *силові трубки* рівного потоку.

1.3.4 Якщо весь простір, в якому розглядається поле, поділено на m силових трубок поля та n прямокутників в кожній трубці, то за допомогою нескладних міркувань можна вирахувати повну електричну провідність між двома тілами:

а) Опір одного прямокутника $r = \frac{\Delta a}{\Delta b \cdot d \cdot \gamma}$; (1.3)

б) Опір всіх прямокутників $R = \frac{r \cdot n}{m} = \frac{\Delta a \cdot n}{\Delta b \cdot m \cdot d \cdot \gamma}$; (1.4)

в) Повна провідність листа $G = d \cdot \gamma \cdot \frac{m}{n} \cdot \frac{\Delta b}{\Delta a}$, (1.5)

де: d - розмір плоско паралельного поля в напрямку, що є перпендикулярним до площини рисунку;

γ - питома провідність матеріалу, в якому досліджується поле.

Користуючись аналогією з електростатичним полем (Табл.1.1), можна скласти вираз для ємності двох заряджених тіл:

$$C = \frac{m \cdot d \cdot \varepsilon_a \cdot \Delta b}{n \cdot \Delta a},$$

де ε_a - абсолютна діелектрична проникність середовища.

Використовуючи аналогію з магнітним полем (див. табл.1.1), можна написати вираз для повної магнітної провідності середовища, якщо існує зображення плоско паралельного магнітного поля:

$$G_m = d \cdot \mu_a \cdot \frac{m}{n} \cdot \frac{\Delta b}{\Delta a},$$

де μ_a – абсолютна магнітна проникність середовища.

1.3 Підготовка до роботи

1.3.1 Вивчити теоретичний матеріал по рекомендованій літературі.

1.3.2 Відповісти усно на всі контрольні запитання.

1.3.3 Виконати заготовку до лабораторної роботи, в який за звичайним стандартом ЗНТУ повинно бути:

- на першій сторінці - титульний лист (із темою роботи);
- на другій сторінці - мета роботи, схема, яку зображено на Рис. 1.2, розрахункові формули (1.3), (1.4), (1.5);
- масштабне (1:2) зображення модельного листа із координатною сіткою.

1.4 Матеріали, інструменти, прилади, обладнання

Лабораторна установка (Рис. 1.2) складається із джерела постійної *е.р.с.* (затискачі: «+», «-») для підведення напруги у 10 В, вольтметра *V* зі середнім розташуванням нульового потенціалу на вимірювальній шкалі. Для знаття експериментальним шляхом точок рівного електричного потенціалу служить щуп (*K*), з'єднаний гнучким провідником з одним із затискачів вольтметра *V*. Другий затискач вольтметра приєднується до середнього затискача дільника напруги.

Дільник напруги (*ДН*) являє собою опір, керований пакетним перемикачем. Перемикач градуйовано так, що з його виходу (середня точка) знімаються 10, 20, 30, ..., 90 процентів від напруги, яка підведена до входних затискачів. Там чином за допомогою дільника напруги і щупа знаходять на модельному листі лінії рівного потенціалу, що відстають одна від одної на фіксовану різницю $\Delta\varphi = 0,1 \cdot U$ (або 10% від напруги джерела живлення).

Модельний лист, в якому досліджується стаціонарне поле, виготовлено із електропровідного паперу товщиною $d = 0,2$ мм. Оскільки товщина (d) цього листа незначна, тому вважаємо, що електричний струм крізь лист рівномірно розподіляється по всій товщині, тобто маємо плоско паралельне поле. На поверхні листа нанесено олівцем сітку зі взаємно перпендикулярними лініями, що служать для точного визначення координат досліджуваних точок.

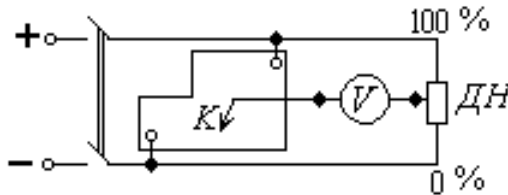


Рисунок 1.2 – Схема

1.5 Порядок виконання роботи

1.5.1 Зобразити у заготовці бланку звіту масштабне зображення модельного листа із координатною сіткою.

1.5.2 Зібрати схему на робочому стенді відповідно до Рис. 1.2. Встановити на електричному щупі пакетним перемикачем дільника напруги 10% від загальної напруги.

1.5.3 Встановити пакетний перемикач діляника напруги 10%. Встановити щуп вертикально на модельний лист і відшукати на цьому листі 7...12 точок рівного потенціалу (щоб вольтметр показував нуль). Потенціал кожної з цих точок буде складати 10% підведеної напруги. Нанести координати цих точок на бланк звіту лабораторної роботи і з'єднати їх плавною кривою лінією.

1.5.4 Встановити пакетним перемикачем діляника напруги інший відсоток (від 20% до 90%) від загальної напруги і знайти щупом 8...12 точок рівного потенціалу на модельному листі для кожного положення пакетного перемикача. Нанести координати цих точок на бланк звіту і з'єднати їх плавною кривою лінією. Особливу увагу слід приділяти точкам, які знаходяться біля границь листа.

1.6 Обробка результатів досліджень

1.6.1 Одержану експериментальну картину ліній рівного потенціалу використаємо як основну для побудови *трубок струму* (силових ліній). Накреслити силові лінії, беручи до уваги рівняння (1.1) і дотримуватись правил побудови картини плоско паралельного поля (Розділ 1.2.3).

1.6.2 Визначити опір однієї комірки сітки поля r за формулою (1.3).

1.6.3 Обчислити повний опір модельного листа R за формулою (1.4).

1.6.4 Обчислити провідність всього листа за формулою (1.5).

1.6.5 Обчислити для будь-якої (за вказівкою викладача) точки наданої моделі параметри електростатичного поля:

$$\varphi; \quad \text{grad } \varphi; \quad \text{div grad } \varphi.$$

1.7 Контрольні запитання

1.7.1 Дайте визначення плоско паралельного поля.

1.7.2 Якими є умови побудови плоско паралельного поля?

1.7.3 Якими є умови відповідності між електричним полем постійного струму в провідному середовищі та електростатичним полем?

1.7.4 В чому, на Вашу думку, полягає перевага застосування нуль-індикатора в даній роботі?

1.7.5 Які існують форми представлення теореми Гауса?

2. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №32

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ДВОХ ПРОВІДНОЇ ЛІНІЇ ПЕРЕДАЧІ

2.1 Мета роботи

Одержати експериментальним та аналітичним шляхом картину електричного поля в провідному листі, яка буде аналогічною до картини електростатичного поля в діелектрику навкруг проводів двох провідної лінії передачі.

2.2 Загальні відомості

Електричне поле в діелектрику, який оточує провідники зі струмом, характеризується рівняннями

$$\operatorname{rot} \vec{E} = 0; \quad \vec{E} = -\operatorname{grad}\varphi; \quad \vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}_0; \quad \operatorname{div} \vec{D} = \rho .$$

В загальному випадку для однорідного середовища розрахунок поля проводять не розв'язанням цих рівнянь, а рішенням рівняння Лапласа. В інженерній практиці бувають випадки, коли аналітичний розрахунок виконати неможливо через складну форму конфігурації провідників зі струмом і їхнього розташування в просторі. Тоді таку задачу вирішують, як правило, на моделях, застосовуючи *метод масштабного моделювання*, коли фізична природа моделі та об'єкту одна і та ж.

При однакових граничних умовах існує аналогія між полем в провідному середовищі моделі та електростатичним полем (див. Таблиця 1.1 на стор. 5).

Наприклад, якщо форма поверхні електродів моделі буде такою, як і форма заряджених тіл оригіналу, тоді граничні умови обох полів подібні, електричне поле моделі буде *подібним* електростатичному полю оригіналу.

Електростатичне плоско паралельне поле двох провідної лінії електропередачі можна дослідити за допомогою електричного поля постійного струму в плоскому листі електропровідного паперу, обрізаному по краях по теоретичній *силовій лінії*.

Розглянемо теоретичну картину *електростатичного поля* навколо двох провідної лінії передачі. Прийемо, що відстань між проводами набагато більша за радіус проводів, тому задача зводиться до розгляду поля навколо двох заряджених ниток (Рис. 2.1).

Розташуємо центр (т. 0) прямокутної системи координат (XOY) посередині між зарядженими нитками (Рис.2.1)

За *принципом накладання* поле заряджених ниток в будь-якій точці простору визначається як сума полів, створених кожною з них:

$$\vec{E} = \vec{E}_{(+\tau)} + \vec{E}_{(-\tau)} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_a} \cdot \vec{a}_o + \frac{-\tau}{2\pi\epsilon_a} \cdot \vec{b}_o ; \quad (2.1)$$

$$\varphi = \varphi_{(+\tau)} + \varphi_{(-\tau)} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_a} \ln\left(\frac{1}{a}\right) - \frac{\tau}{2\pi\epsilon_a} \ln\left(\frac{1}{b}\right) = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_a} \ln\left(\frac{b}{a}\right), \quad (2.2)$$

де: τ – лінійна щільність зарядів, розташованих на нитці;

a – відстань від позитивно зарядженої нитки до обраної точки простору;

b – відстань від негативно зарядженої нитки до обраної точки простору.

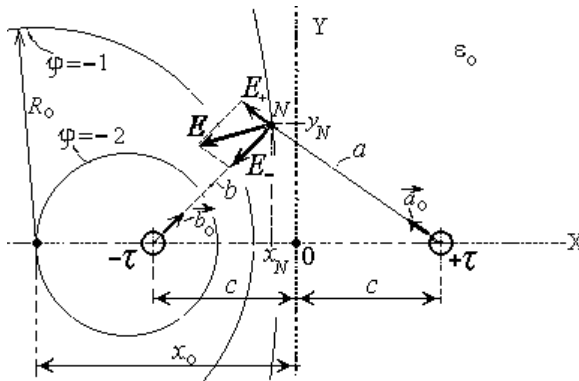


Рисунок 2.1 – Схема двох провідної лінії і вектори електричного поля в точці N

Еквіпотенціальні лінії поля повинні задовольняти рівнянню:

$$\frac{b}{a} = k = const .$$

Це рівняння – рівняння кола. Отже, еквіпотенціальні лінії мають свій радіус і свій центр. Якщо вразити відстані a та b через координати x та y , маємо:

$$k^2 = \frac{(c+x)^2 + y^2}{(c-x)^2 + y^2} .$$

Після перетворень отримаємо: $(x-x_0)^2 + y^2 = R^2$.

Отже, радіуси цих еквіпотенціальних ліній знаходимо за формулами:

$$R = \sqrt{x_0^2 - c^2} = c \cdot \left| \frac{2k}{k^2 - 1} \right|, \quad (2.3)$$

а центри кіл рівного потенціалу лежать на координатній вісі X

$$x_0 = c \cdot \frac{k^2 + 1}{k^2 - 1}; \quad y_0 = 0. \quad (2.4)$$

Силкові лінії вектора $\vec{E}$ є сімейством дуг, які перпендикулярні до ліній рівного потенціалу. Для силової лінії характерно, що з будь якої її точки кут θ , під яким видно хорду AB , був постійний. Таким чином, лінії вектора $\vec{E}$ є *дугами кола*, що опираються на заряджені нитки. Центри цих кіл лежать на вісі Y . Лінії рівного потенціалу та силкові лінії проводять так, щоб приріст потенціалу ($\Delta\phi$) та *приріст* потоку вектора напруженості ($\vec{E} \cdot \vec{ds}$) від лінії до лінії був постійним.

Щоб силкові лінії ділили простір на трубки рівного струму, будуємо кола через точки A та B так, щоб при переході від одної лінії до іншої кут між хордами різних ліній був однаковим ($\alpha = \text{const}$).

Для побудови цих кіл проводимо діаметральну до затисків AB лінію CD (співпадає з віссю Y). Кут CAD ділимо на рівні частки α , число яких буде дорівнювати числу трубок струму. Проводимо із A промені, що відстоять один від одного на кут α . Точки перетину променів з лінією CD лежать на шуканих колах. Положення центрів силових ліній та їхні радіуси знаходимо шляхом стандартних геометричних побудов.

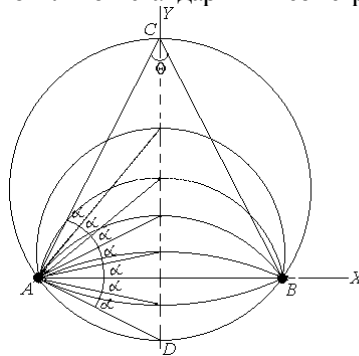


Рисунок 2.2 – Побудова силових ліній картини поля двох провідної лінії

2.3 Підготовка до роботи

2.3.1 Вивчити теоретичний матеріал по рекомендованій літературі.

2.3.2 Відповісти усно на всі контрольні запитання.

2.3.3 Виконати заготовку до лабораторної роботи, в якій за звичайним стандартом ЗНТУ повинно бути:

- на першій сторінці - титульний лист (із темою роботи);
- на другій і третій сторінках - мета роботи, масштабне (1:2) зображення модельного листа із координатною сіткою;
- на четвертій – робоча схема, яку зображено на Рис. 1.2, розрахункові формули (2.1), (2.2), (2.3) і (2.4).

2.4 Матеріали, інструменти, прилади, обладнання

Лабораторна установка (Рис. 1.2) в своєму складі:

- джерело постійної напруги (10 В, затискачі «+» та «-»);
- вольтметр зі середнім розташуванням нульового потенціалу на вимірювальній шкалі;
- модельний лист у формі круга;
- щуп, що з'єднується гнучким провідником із вольтметром;
- дільник напруги, керований пакетним перемикачем.

Перемикач градуйовано так, що з його виходу (середня точка) знімаються 10, 20, 30, ..., 90 процентів від напруги, яка підведена до вхідних затискачів. Там чином за допомогою дільника напруги і щупа знаходять на модельному листі лінії рівного потенціалу, що відстоять одна від одної на фіксовану різницю $\Delta\varphi = 0,1 \cdot U$ (або 10% від напруги джерела живлення).

Модельний лист складається з листа електропровідного паперу в формі круга. По краях листа розміщені затискачі для підведення електричної напруги. Затискачі розміщені симетрично до середньої діаметральної лінії. Товщина цього листа незначна, тому вважаємо, що електричний струм крізь лист рівномірно розподіляється по всій товщині, тобто маємо плоско паралельне поле. На поверхні листа нанесено олівцем сітку зі взаємно перпендикулярними лініями, що служать для точного визначення координат досліджуваних точок.

2.5 Порядок виконання роботи

2.5.1 Зібрати схему на робочому стенді відповідно до Рис. 1.2. Встановити на електричному щупі пакетним перемикачем дільника напруги 10% від загальної напруги.

2.5.2 Встановити щуп вертикально на модельний лист і відшукати на цьому листі 7...12 точок рівного потенціалу (щоб вольтметр показував нуль). Потенціал кожної з цих точок буде складати 10% підведеної напруги. Нанести координати цих точок на бланк звіту лабораторної роботи і з'єднати їх плавною кривою лінією.

2.5.3 Встановити пакетним перемикачем дільника напруги інший відсоток (від 20% до 90%) від загальної напруги і знайти щупом 8...12 точок рівного потенціалу на модельному листі для кожного положення пакетного перемикача. Нанести координати цих точок на бланк звіту і з'єднати їх плавною кривою лінією.

2.6 Обробка результатів досліджень

2.6.1 Одержану експериментальну картину ліній рівного потенціалу використаємо як основну для побудови *трубок струму* (силових ліній). Накреслити силові лінії, дотримуватись правил побудови картини плоско паралельного поля (розділ 1.2.3) і Рис. 2.2.

2.6.2 Визначити за формулами (2.3) і (2.4) радіуси і розташування центрів ліній рівного потенціалу. Побудувати екіпотенціальні лінії. Порівняти із знятими експериментально

Примітка: Відстань між проводами лінії на модельному листі (між затискачами до яких підведена напруга) набагато більша за діаметр цих проводів. Тому вважаємо, що електричні вісі практично співпадають з геометричними висями електричних проводів:

2.6.3 Обчислити для будь-якої (за вказівкою викладача) точки наданої моделі параметри електростатичного поля:

$$\varphi ; \quad E ; \quad \operatorname{div} \operatorname{grad} \varphi .$$

2.7 Контрольні запитання

2.7.1 Дайте визначення плоско паралельного поля.

2.7.2 Якими є умови побудови плоско паралельного поля?

2.7.3 Якими є умови побудови картини поля?

2.7.4 Наведіть формули для визначення потенціалу та напруженості в точках поля, яке утворене двох провідною лінією.

3. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №33

ДОСЛІДЖЕННЯ ОПОРУ ЗАЗЕМЛЕННЯ ТА ПРОСТОРОВОГО РОЗТІКАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ В ПРОВІДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

3.1 Мета роботи

Вивчити методику експериментального дослідження залежності опору заземлення від форми заземлюючих провідників; дослідити явище просторового розтікання електричного струму в провідному середовищі від об'ємного провідника в формі кулі та стержня.

3.2 Загальні відомості

3.2.1 Класифікація заземлення

В електротехнічних устаткуваннях широко застосовуються заземлення, тобто електричне з'єднання із землею елементів електричних машин, апаратів, приладів і т.п. заземлюючими пристроями. В залежності від призначення вони поділяються на захисні, робочі і заземлення захисту від блискавки.

Захисне заземлення – це заземлення точок електрообладнання з метою забезпечення електробезпеки. Воно призначається для захисту людей від враження електричним струмом в разі дотику до металевих поверхонь (наприклад, заземлення корпусів електричних машин та апаратів). Різновидом захисного заземлення є так зване *базове заземлення* повітряних ЛЕП.

Робочим (або *функціональним*) називають заземлення будь-яких точок струмопровідних частин електроустановок, що призначено не для захисту, а для *забезпечення належної роботи* електроустановки в нормальних або аварійних режимах.

Заземлення *захисту від блискавки* – це навмисне з'єднання із землею розрядників і приймачів блискавки для захисту людей, будівель і обладнання з метою відведення від них струмів блискавки в землю.

При здійсненні заземлення електроустановки з'єднують з провідниками, що зариті в землю. Їх називають *заземлювачами*. Заземлення здійснюється в установках постійного та змінного струмів заземлювачами різної форми (куля, стержень, труба, пластина і т.п.).

Розрахунок заземлюючих пристроїв полягає у визначенні опору заземлення, дослідженні просторового розтікання електричного струму та визначення крокових напруг на поверхні землі поблизу

заземлювачів. Такий розрахунок – розрахунок електричного поля в об'ємних провідниках – не завжди можна виконати аналітично. Тому дану задачу вирішують, як правило, на моделях, застосовуючи *метод масштабного моделювання*, коли фізична природа моделі та об'єкту, що підлягає захисту, одна і та ж.

3.2.2 Розрахунок опору заземлення

Під час аварійного випадку в електроустановці струм короткого замикання проходить до землі через заземлювач, зустрічає на своєму шляху опір, який залежить від форми заземлювачів, матеріалу заземлюючих пристроїв та провідності ґрунту. При цьому опір матеріалів самого заземлюючого електрода, як правило, незначний.

При розрахунку опору заземлення звичай використовують його зворотну величину – *провідність заземлення*:

$$G_z = \frac{1}{R_z} = \frac{I}{U} ,$$

де: I - струм, що протікає через заземлювач, А;

U - падіння напруги на заземлювачі, В.

На підставі *методу аналогії* електричного поля постійного струму з електростатичним полем, заземлювач у формі кулі, яку занурено глибоко в землю (рис. 3.1), можна уявити у вигляді відокремленої кулі, що розташовано в електростатичному полі. Ємність такої кулі радіуса r_0 дорівнює

$$C_k = 4\pi\epsilon_a \cdot r_0 ,$$

де ϵ_a – абсолютна діелектрична проникність середовища.

По аналогії з формулою ємності, провідність електроду в формі кулі дорівнює

$$G_k = \frac{1}{R_k} = 4\pi\gamma \cdot r_0 , \quad (3.1)$$

де: γ - питома провідність середовища;

r_0 - радіус електроду.

Якщо заземлюючий електрод занурено в землю наполовину, (тобто у формі півкулі), його провідність буде в двічі меншою:

$$G = 2\pi \cdot \gamma \cdot r_0 . \quad (3.2)$$

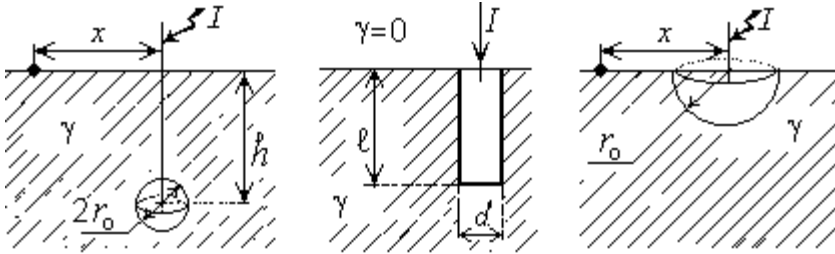


Рисунок 3.1 – Різні форми заземлювачів

В тому випадку, коли заземлюючий електрод має форму стержня (рис. 3.1), його провідність по аналогії з ємністю самотнього циліндра, розташованого в електростатичному полі, буде:

$$G_{\text{ст}} = \frac{2\pi \cdot \gamma \cdot \ell}{\ln\left(\frac{2\ell}{0.5 \cdot d}\right)}, \quad (3.3)$$

де: ℓ – довжина зануреної в провідне середовище частини електроду;
 d – діаметр перерізу стержня.

3.2.3 Питома об'ємна провідність

Розглянемо деякий об'єм з провідним середовищем, в якому при протіканні струму I існує електричне поле. Виділяємо в ньому силову трубку з поперечним перерізом dS . На ділянці силовій трубки має місце спад напруги dU , тому струм, що протікає через трубку:

$$dI = \frac{dU}{R},$$

де $R = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{d\ell}{dS}$, – опір ділянки силовій трубки.

$$\text{Таким чином,} \quad dI = \gamma \cdot dS \cdot \frac{dU}{d\ell} = \gamma \cdot dS \cdot E.$$

Тобто густина струму:

$$\frac{dI}{dS} = \delta = \gamma E,$$

де: γ – питома провідність;

E – напруженість електричного поля в провідному середовищі.

Питома провідність визначає електропровідність речовини і в загальному випадку може бути різною в різних точках об'єму (при неоднорідному середовищі). Питома провідність однорідного середовища може бути визначена, якщо провідник являє собою тіло правильної форми: циліндр, прямокутник і т.д. за формулою:

$$\gamma = \frac{\ell}{R \cdot S} \quad (3.4)$$

де ℓ – довжина провідника;

R – опір провідника;

S – площа перерізу провідника.

3.2.4 Визначення питомої провідності провідного середовища

Для визначення опору заземлення необхідно знати об'ємну питому провідність середовища, в якому розташовано заземлювач.

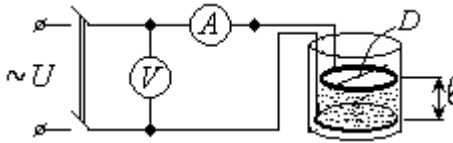


Рисунок 3.2 – Схема для визначення об'ємної питомої провідності середовища

В наданій лабораторній установці для визначення питомої провідності середовища використовуються два дискових електроди (рис.3.2). Якщо на ці електроди підключити напругу і зміряти струм, то, знаючи геометричні розміри дисків та відстань між ними, можна визначити питому провідність середовища між пластинами, тобто провідність провідного середовища ємкості. При цьому, звичайно, припускаємо, що провідний стовп води має циліндричну форму а провідне середовище між електродами є однорідним:

$$\gamma = \frac{I \cdot \ell}{U \cdot S} , \quad (3.5)$$

де I – показання амперметра в схемі (Рис 3.2);

ℓ – відстань між пластинами;

U – показання вольтметра в схемі;

$S = \frac{\pi D^2}{4}$ – площа перерізу провідного стовпа води;

D – діаметр плоских металевих електродів.

3.2.5 Крокова напруга

При аварійному стані заземленої електроустановки струм короткого замикання проходить через заземлюючий електрод в землю. При проходженні струму в землі на її поверхні має місце спад напруги, який поблизу місць заземлення може досягати небезпечних для життя людей значень вже на відстані, що дорівнює довжині кроку людини (крокова напруга). Дуже важливо вміти обчислити опір розтікання струму в землі при різних конструкціях заземлювачів.

Задача вважається вирішеною, якщо крокова напруга на поверхні землі ($U_{кр}$) ніде не перебільшує значень, небезпечних для життя людини. Наприклад, для заземлювача, який має форму кулі крокову напругу знаходять:

$$U_{кр} = \frac{I}{4\pi\gamma \cdot x} - \frac{I}{4\pi\gamma \cdot (x + 0.8)} \quad (3.6)$$

де I – струм, що протікає через заземлювач, А;

x – відстань від точки на поверхні землі до центру заземлювача, м;

0,8 – середня довжина кроку людини, м.

Для заземлювача, що має форму стержня опір розтікання буде:

$$R_{cm} = \frac{U}{I} = \frac{1}{4\pi\gamma \cdot \ell} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot \ell}{d}\right) \quad (3.7)$$

3.3 Підготовка до роботи

3.3.1 Вивчити теоретичний матеріал по наданій темі.

3.3.2 Відповісти усно на всі контрольні запитання.

3.3.3 Обчислити крокову напругу та провідність заземлення для кулькового заземлювача при короткому замиканні в електроустановках, якщо відомі: струм короткого замикання (I_k); відстань до центру заземлювача на поверхні землі (x); провідність ґрунту (γ); радіус кулькового електроду (r_0). (Див. Табл. 3.1).

3.3.4 Виконати заготовку до лабораторної роботи, в який за звичайним стандартом ЗНТУ повинно бути:

- на першій сторінці - титульний лист (із темою роботи);
- на другій сторінці - мета роботи, схеми, які зображено на Рис. 3.2, Рис. 3.3 і Рис. 3.4;
- Таблиці, які приведено в робочому завданні (розділ 3.5);
- Розв'язок задачі по п.3.3.3.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для завдання 3.3.3

Номер стенду	1	2	3	4	5	6	7	8
$I_{к.з} , KA$	10	20	30	4	5	6	7	8
$r_0 , м$	1.0	1.2	0.6	0.8	0.4	1.1	1.2	0.5
$\ell , м$	1.0	2.0	3.0	1.5	2.5	3.5	0.8	2.1
$\gamma , \frac{O.M}{м}$	8	7	6	5	4	3	2	1
$x , м$	10	20	15	25	35	6.6	7.7	8.0

3.4 Матеріали, інструменти, прилади, обладнання

Лабораторна установка складається зі змонтованої на столі металевої ванни з ізоляційною кришкою. В центрі кришки знаходиться отвір для закріплення заземлюючих електродів двох форм (куля та стрижень). Також по діагоналі кришки та по лінії паралельній стінці ванни є отвори для опускання вимірювального зонду.

Заземлюючі електроди мають такі геометричні розміри:

- радіус кулі $r_0 = 24 \text{ мм}$;
- діаметр перерізу *стержневого* електрода $d = 8 \text{ мм}$;

Для дослідження розподілу потенціалів служить вимірювальний *зонд*, який являє собою ізольований по всій довжині стержень, один кінець якого має держак з проводом, для приєднання до *лампового вольтметра*.

В лабораторну установку також входять два дискових електроди діаметром $D=50 \text{ мм}$, які розташовані між собою на відстані $\ell=24 \text{ мм}$ один від одного, закріплені в циліндричній посудині всередині ванни.

Ламповий вольтметр, який живиться від розетки 220 В , амперметр і вольтметр електромагнітної системи.

Джерелом живлення лабораторної установки є джерело *е.р.с.* величиною 10 В , частотою 50 Гц .

На даній лабораторній установці відтворюється в масштабі приблизно 1:25 явища розтікання струму в землі від заземлюючих провідників.

3.5 Порядок виконання роботи

3.5.1 Визначення питомої провідності середовища.

Зібрати електричне коло за схемою, яку зображено на Рис. 3.2. Ввімкнути стенд. Показання приладів занести до Табл.3.2.

Таблиця 3.2 – Визначення питомої провідності середовища

Результати вимірювань		Розрахунок
U, B	I, A	$\gamma, \frac{O_m}{M}$

3.5.2 Визначення опору заземлення кульового електрода для двох випадків:

- куля занурена в воду наполовину свого діаметра;
- куля занурена в воду повністю на відстань, приблизно рівну половині відстані від поверхні води до дна ванни;

Зібрати електричне коло за схемою (рис. 3.3). Встановити кульовий електрод у відповідне положення, закріпити затискачем. Ввімкнути стенд. Показання приладів занести до Табл. 3.3.

3.5.3 Визначення опору заземлення стрижньового електрода для двох випадків:

- стержень занурено в воду наполовину своєї довжини;
- стержень занурено в воду повністю на відстань, яка приблизно дорівнює половині відстані від поверхні води до дна ванни;

Зібрати електричне коло за схемою (рис. 3.3), тільки зробити заміну кульового електрода на стрижньовий. Установити стрижньовий електрод у відповідне положення, закріпити затискачем. Ввімкнути стенд. Показання приладів занести до Табл. 3.4.

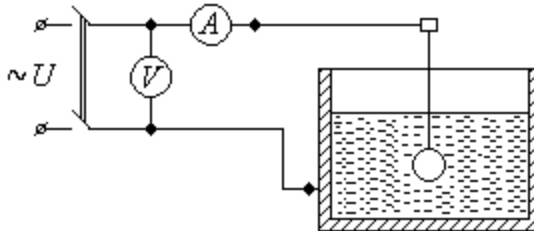


Рисунок 3.3 – Схема для визначення опору заземлення

Таблиця 3.3 – Визначення опору заземлювача (півкуля, куля)

Вимірювання		Розрахунок	Вимірювання		Розрахунок
$U, В$	$I, А$	$R_{пк}, Ом$	$U, В$	$I, А$	$R_k, Ом$

Таблиця 3.4 – Визначення опору стержневого заземлювача

Вимірювання		Розрахунок	Вимірювання		Розрахунок
$U, В$	$I, А$	$R_{ст}, Ом$	$U, В$	$I, А$	$R_c, Ом$

3.5.4 Дослідження просторового розтікання електричного струму в провідному середовищі за допомогою зонда для двох видів заземлення:

- Стержневий електрод;
- Кульовий електрод;

Зібрати електричне коло за схемою (рис. 3.4). Ввімкнути стенд. Включити ламповий вольтметр (час нагріву 3÷5 хвилин).

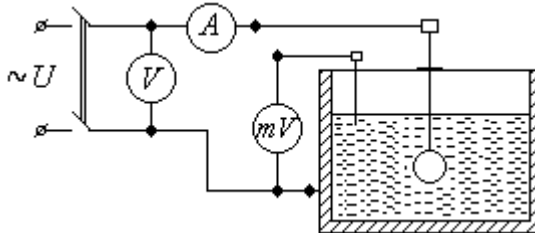


Рисунок 3.4 – Схема для дослідження просторового розтікання струму

Зміряти розподіл потенціалу при розтіканні струму від заземлюючих електродів (кулі, стержня), коли вони занурені в воду на відстань, що дорівнює приблизно половині відстані від поверхні води до дна ванни. Вимірювання потенціалу проводити в точках по лінії, що є паралельною стінці ванни, та по діагоналі ванни при двох положеннях зонда:

- а) зонд торкається поверхні води;
- б) зонд занурений на глибину 6 см.

Показання лампового вольтметра занести до Табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Розподіл потенціалу в провідному середовищі

Форма електрода	Глибина занурення зонда	Розподіл потенціалу вздовж лінії бака										
		Паралельно стінці					По діагоналі бака					
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6
Стрижень	а)											
	б)											
Куля	а)											
	б)											

3.6 Обробка результатів досліджень

3.6.1 Знайти питому провідність γ середовища ванни.

3.6.2 Вирахувати опір кульового заземлювача за допомогою формул (3.1) та (3.2).

3.6.3 Знайти опір кульового заземлювача за даними Табл. 3.3. Порівняти розрахункові значення з дослідними.

3.6.4 Знайти опір стержневого заземлювача (формула (3.7)).

3.6.5 Вирахувати опір стержневого заземлювача за даними Табл. 2.4. Порівняти розрахункові значення з дослідним.

3.6.6 За даними Табл. 3.5 побудувати графік розподілу потенціалу в об'ємному провідникові в залежності від відстані до електродів $\varphi = f(x)$ для різних глибин та різних форм заземлювачів.

3.6.7 По результатам досліджень зробити висновки.

3.7 Контрольні запитання

3.7.1 Що називають опором заземлення?

3.7.2 Як визначити опір різних форм заземлення?

3.7.3 Що називають кроковою напругою? Як її можна розрахувати?

3.7.4 Для чого потрібне заземлення промислових установок?

3.7.5 Які існують види заземлення та яке їхнє призначення?

3.7.6 Як визначається в лабораторній роботі питома об'ємна провідність провідного середовища ванни?

3.7.7 Від чого залежить розподіл потенціалу навколо заземлювача?

3.7.8 В чому полягає метод аналогії? Чому його можна застосувати для розрахунків провідності заземлення?

4. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №34

ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЦИЛІНДРИЧНОЇ КОТУШКИ ЗІ СТРУМОМ

4.1 Мета роботи

Дослідження розподілу індукції магнітного поля вздовж вісі та вздовж діаметру короткої циліндричної котушки з електричним струмом; порівняння експериментального розподілу напруженості магнітного поля вздовж осі котушки з теоретичним, який одержано розрахунковим шляхом.

4.2 Загальні відомості

Магнітне поле створюється рухомими електричними зарядами і проявляє себе через *силову дію* на магніти, заряди, що рухаються у просторі, або на провідники зі струмами.

Магнітна індукція ***B*** (одиниці виміру: *Тл*) характеризує силову дію магнітного поля на струм в середовищі із наданими магнітними властивостями. Лінії магнітної індукції – це криві, дотичні до яких у будь-якій точці збігаються із напрямком вектора ***B*** в цих точках простору. Ці лінії завжди замкнуті самі на себе, оскільки магнітне поле – *вихрове* поле.

Напруженість магнітного поля ***H*** (одиниці виміру: A/m) – це векторна величина, яка дорівнює різниці між вектором магнітної індукції і вектором намагніченості:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B} - \mathbf{M} ,$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнітна постійна (проникність вакууму).

Напруженість магнітного поля не залежить від магнітних властивостей середовища і пов'язує магнітне поле в наданій точці простору тільки зі струмом і його розташуванням в просторі (відстань і напрям до наданої точки). Якщо середовище однорідне та ізотропне (в магнітному сенсі), тоді магнітна індукція і напруженість пов'язані співвідношенням:

$$\mathbf{B} = \mu \mu_0 \mathbf{H} , \tag{4.1}$$

де $\mu_a = \mu \mu_0$ – абсолютна магнітна проникність середовища.

4.2.1 Закони магнітного поля

Для розрахунку за межами джерел струму стаціонарних та квазістаціонарних магнітних полів, що мають вісь симетрії, можуть бути використані закони Біо – Савара – Лапласа та Повного струму.

Закон Повного струму (в інтегральній формі):

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \sum I . \quad (4.2)$$

Закон Біо – Савара – Лапласа визначає величину і напрямок вектора магнітної індукції в будь-якій точці простору магнітного поля, яке створено провідником зі струмом:

$$d\vec{B} = \mu \mu_0 \cdot \frac{I \cdot [\vec{dl} \times \vec{R}_0]}{4\pi \cdot r^2} . \quad (4.3)$$

Згідно з цим законом малий відрізок проводу dl , по якому протікає струм I , створює індукцію магнітного поля $d\vec{B}$ в точці, що віддалена на відстань r від цього елемента; $\vec{R}_0$ – радіус-вектор, проведений вздовж напрямку r від dl до точки, в якій визначається магнітне поле.

При співставленні обох законів слід визначити, що закон повного струму може застосовуватись тільки до замкнутих контурів зі струмом, тоді як закон Біо – Савара – Лапласа може застосовуватись і до елементів струму (до відрізків провідників зі струмом).

4.2.2 Приклади розрахунків магнітного поля

Знайдемо напруженість магнітного поля в довільній точці T (Рис.4.1), що знаходиться на вісі кругового витка радіуса R , по якому протікає струм I .

Оскільки $\vec{R}_0 \perp \vec{dl}$, тоді векторний добуток $\vec{dl} \times \vec{R}_0 = dl$.

Тому в точці T модуль напруженості магнітного поля, яку створено елементарним відрізком струму $I \cdot dl$, з огляду на формули (4.3) і (4.1) буде

$$dH = \frac{I \cdot dl}{4\pi r^2} .$$

Кожні два рівних елемента витку dl та dl' ; що знаходяться на протилежних; кінцях його діаметру, обумовлюють в точці T вектори $\vec{dH}$ та $\vec{dH'}$. Їхні складові, які є *нормальні* до вісі OX , взаємно

компенсуються. А от складові цих векторів, що спрямовані *вздовж* вісі OX – підсумовуються.

Отже, при обчисленні в наданій точці напруженості поля $\mathbf{H}$, яка обумовлена струмом I в усьому витку, достатньо обчислити тільки складову кожного елементарного вектора *в напрямку* вісі OX . Вона дорівнює $dH \cdot \sin \beta$, де β – кут між віссю OX , та напрямком r .

Треба мати на увазі, що вектор $\vec{dH}$ лежить в площині, перпендикулярній до відрізка $\vec{dl}$ зі струмом I , та пов'язаний з напрямком цього струму правилом *право ходового гвинта*. Інтегруючи за формулою (4.3) вираз

$$dH \cdot \sin \beta = \frac{I \cdot dl \cdot \sin \beta}{4\pi r^2}$$

вздовж всього витка, одержуємо залежність значення напруженості поля в точці T від струму:

$$H_x = \int_0^{2\pi R} \frac{I \cdot dl}{4\pi r^2} \sin \beta = \frac{I \cdot \sin \beta}{4\pi r^2} \cdot (2\pi R - 0) = \frac{IR}{2r^2} \sin \beta .$$

Оскільки $\frac{R}{x} = \sin \beta$, тоді: $H_x = \frac{I}{2R} \sin^3 \beta$.

Користуючись цим виразом, знайдемо напруженість магнітного поля в точці, що лежить на вісі одношарової циліндричної котушки, яка має довжину l , число витків W , радіус витків R . (рис.4.1).

Виділимо елемент dl , який можна розглядати як тонкий круговий контур зі струмом

$$dI = \frac{I \cdot W}{l} dl .$$

Напруженість магнітного поля, яка створена цим струмом

$$dH_x = \frac{dI}{2R} \sin^3 \beta = \frac{I \cdot W \cdot \sin^3 \beta}{2R \cdot l} dl$$

Напруженість магнітного поля в точці T , яку створено струмом всієї котушки:

$$H_x = \int_{-l/2}^{l/2} \frac{I \cdot W \cdot \sin^3 \beta}{2R \cdot l} dl .$$

Оскільки $\frac{x-l}{R} = \cot \beta$, тоді: $\frac{dl_1}{r} = \frac{dl}{\sin^3 \beta}$. Отже,

$$H_x = \frac{Iw}{2l} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sin \beta \cdot d\beta = \frac{Iw}{2l} (\cos \beta_1 - \cos \beta_2) \quad , \quad (4.4)$$

де β_1 та β_2 – крайні значення β , які відповідають краям котушки. Косинус цих кутів визначають за формулами:

$$\cos \beta_1 = \frac{\left(x + \frac{l}{2}\right)}{\sqrt{R^2 - \left(x + \frac{l}{2}\right)^2}} \quad ; \quad \cos \beta_2 = \frac{\left(x - \frac{l}{2}\right)}{\sqrt{R^2 - \left(x - \frac{l}{2}\right)^2}} \quad .$$

Для магнітної індукції в будь-якій точці на вісі x маємо вираз

$$B_x = \frac{\mu_0 I w}{2l} (\cos \beta_1 - \cos \beta_2) \quad . \quad (4.5)$$

Формула (4.4) служить для розрахунку залежності $H=f(x)$ при відсутності в соленоїді сталюого осердя.

4.2.3 Вимірювання магнітного поля

Індукцію і напруженість магнітного поля в окремих фіксованих точках легше всього вимірити за допомогою вимірювальної котушки, яка має невеликі розміри, вимірювальна котушка фіксує значення індукції змінного електромагнітного поля, нормального до її перерізу. Діюче значення, напруги на виході вимірювальної котушки

$$U_k = 4,44 \cdot f \cdot B_m \cdot S \cdot W_B \quad ,$$

де: f - частота живильного поля, (одиниці виміру $1/c$);

B_m - амплітуда індукції електромагнітного поля, (Тл);

S - площа перерізу вимірювальної котушки, (m^2);

W_B - кількість витків вимірювальної котушки.

Постійна вимірювальної котушки обчислюється за формулою:

$$K_u = \frac{B_m}{U_k} = \frac{1}{4,44 \cdot S \cdot W_B \cdot f} \quad , \quad (Тл/В) \quad (4.6)$$

Часто постійну визначають експериментально. Для цього необхідно мати джерело електромагнітного поля, для якого легко підрахувати індукцію в фіксованих точках. До таких джерел можна віднести довгу циліндричну котушку (соленоїд). В центрі такої довгої котушки у якій $l \gg 2R$ (рис.4.1), маємо $\cos \beta_1 = 1$ та $\cos \beta_2 = -1$.

Згідно з формулою (4.5) магнітна індукція в центрі соленоїду:

$$B_m = \frac{\mu_a \cdot I_m W_c}{l} \quad (4.7)$$

де: I_m - амплітуда струму соленоїда,
 W_c - число витків соленоїда.

В такий довгий соленоїд вносять вимірювальну котушку, встановлюють певний струм соленоїда та фіксують ламповим вольтметром напругу на виході вимірювальної котушки. Експериментальна постійна вимірювальної котушки:

$$K_u = \frac{B_m}{U_k} = \frac{\mu_a \cdot I_m \cdot W_c}{l \cdot U_k} \quad (4.8)$$

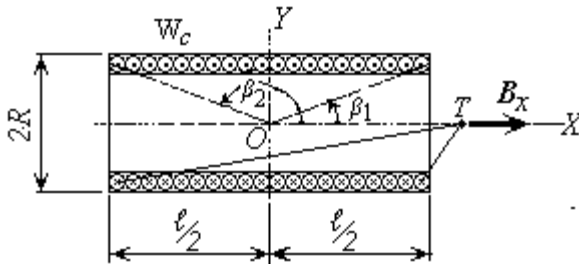


Рисунок 4.1 – Соленоїд і напрямок струму в його обмотці

4.3 Підготовка до роботи

- 4.3.1 Вивчити теоретичний матеріал по наданій темі.
- 4.3.2 Відповісти усно на всі контрольні запитання.
- 4.3.3 Виконати заготовку до лабораторної роботи, в якій за звичайним стандартом ЗНТУ повинно бути:

- на першій сторінці - титульний лист (із темою роботи);
- на другій сторінці - мета роботи, схеми (Рис. 4.2, Рис. 4.3);
- таблиці, які потрібні для виконання робочого завдання.

4.4 Матеріали, інструменти, прилади, обладнання

Лабораторна установка складається з:

- лабораторного автотрансформатора (ЛАТР);
- амперметра електромагнітної системи;
- лампового вольтметра;
- вимірювальної котушки (зонду);
- еталонного соленоїду;
- дослідної котушки великих розмірів.

Обмотка котушки, що підлягає досліді, має циліндричну форму, намотана в один шар на бакелітовому циліндрі радіусом $R=120$ мм. Вздовж діаметру прикріплена спеціальна лінійка з поділками.

Зонд являє собою вимірювальну котушку з тонкого проводу, намотаного на ізолюючу основу. Її параметри: $W_z=1200$; $R_z=10$ мм. Для зручності фіксації положення на її рукоятці нанесені поділки. Наведена у вимірювальній котушці напруга вимірюється ламповим вольтметром.

Соленоїд являє собою котушку циліндричної форми (рис.4.1) з одним шаром витків W_c . Параметри соленоїду: кількість витків $W_c=200$; його радіус $R_c=20$ мм; довжина $l=400$ мм.

Для утворення магнітного поля котушки підключають до електричної мережі за допомогою ЛАТР-а. Значення індукції в котушках обчислюють за формулою (4.5).

4.5 Порядок виконання роботи

4.5.1 Зібрати схему з соленоїдом згідно рис. 4.2.

Ввімкнути напругу живлення. ЛАТРом утворити в соленоїді електромагнітне поле при струмі в 1 А та 2 А. Провести градуювання вимірювальної котушки, помістивши її в центр соленоїду (тобто експериментально визначити постійну вимірювальної котушки при двох різних струмах в соленоїді).

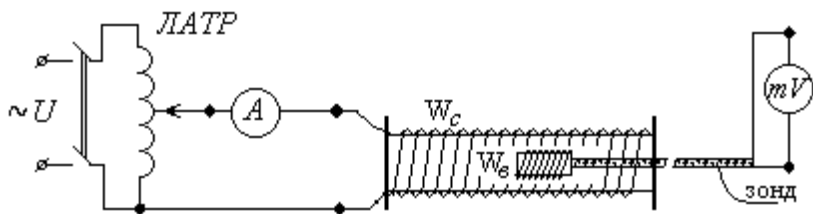


Рисунок 4.2 – Схема для градуювання вимірювальної котушки

4.5.2 Зібрати схему з дослідною котушкою згідно рис.4.3.

Встановити струм в дослідній котушці в 1 А та 2 А і дослідити її поле за допомогою вимірювальної котушки по осі дослідної котушки та по її діаметру на половині висоти через кожні 20 мм. Результати експерименту подати у відповідних таблицях та графіках.

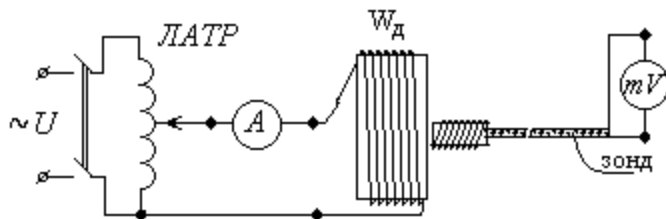


Рисунок 4.3 – Схема для дослідження магнітного поля котушки

4.6 Обробка результатів досліджень

4.6.1 Порівняти обчислену теоретично за формулою (4.6) постійну вимірювальної котушки з експериментальною, одержаною при вимірюванні в соленоїді (формула (4.8)).

4.6.2 Порівняти обчислену теоретично залежність індукції електромагнітного поля вздовж вісі дослідної котушки (формула (4.5)) і зняту експериментально (п. 4.5.2). Результати подати у вигляді графіків.

4.7 Контрольні запитання

4.7.1 Як можна сформулювати закон Біо-Савара-Лапласа та закон Повного струму? Назвіть область їхнього застосування.

4.7.2 Наведіть основні величини, що характеризують магнітне поле та співвідношення між ними.

4.7.3 Як залежить індуктивність котушки від кількості її витків? Знайдіть індуктивність соленоїду та дослідної котушки.

4.7.4 Знайти магнітну індукцію в точці O , якщо провідник зі струмом $I=19,1\text{ A}$ має вигляд, зображений на Рис.4.4. Радіус $R=20\text{ см}$.

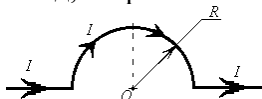


Рисунок 4.4 – Схема провідника зі струмом

5. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

5.1 Демирячян К.С. ТОЭ, т.3 –4-е изд./ Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. – СПб.: Питер, 2003. – 364 с.: ил.

5.2 Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники: Учебное пособие для вузов/ Под ред. проф. П.А. Ионкина.– М.: Энергоиздат, 1982. – 768 с.: ил.

5.3 Навчальний сайт // [http:// electricity.zp.ua](http://electricity.zp.ua).