

УДК 537.8

Курбацький В.П.¹, Малахов Є.К.²

¹ канд. фіз.-мат. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. БК-814 НУ «Запорізька політехніка»

ВИМІРЮВАННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ: ПАРАДОКС ІНДУКТИВНО ПОВ'ЯЗАНИХ КОНТУРІВ

У лабораторному практикумі кафедри фізики важливе місце належить роботі № 24 «Вивчення магнітного поля на осі колового струму». Схема проведення вимірювань магнітного поля ілюструється рис. 1. Котушка 1 приєднана до генератора синусоїдальної напруги u_g . В невеликій індикаторній котушці 2 спостерігається сигнал, пропорційний усередненій по її перетину індукції магнітного поля, утвореного струмом I_1 .

У первісному варіанті роботи вимірювалось падіння напруги на індикаторній котушці з використанням осцилографа. Потім, очевидно з метою спрощення і підвищення точності вимірювань, почали вимірювати

індукційний струм I_2 за допомогою міліамперметра. Але така заміна призвела до неочікуваного результату: значно погіршилось узгодження експериментальних значень поля з теоретичними, розрахованими за формулою Біо-Савара-Лапласа (рис. 2). Зауважимо, що цей факт залишався довгий час непоміченим з тої причини, що в роботі використовувалась ліанеризація залежності індукції магнітного поля від відстані до генеруючої котушки, яка не дозволила правильно оцінити ступінь відхилення експериментальних результатів від теорії.

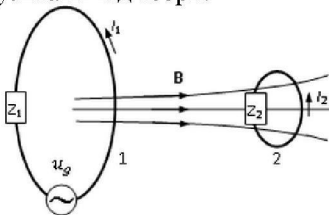
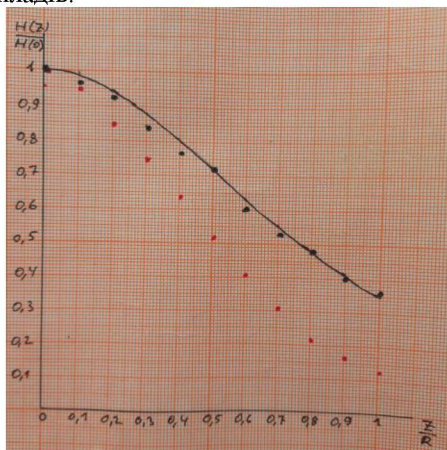


Рисунок 1 – Вимірювання магнітного поля індукційним методом.

Метою роботи є дати пояснення парадоксального результату заміни вимірювальних приладів.



суцільна лінія – розрахунок за формулою $\frac{H(z)}{H(0)} = \frac{1}{\left(\frac{z^2}{R^2} + 1\right)^{3/2}}$; чорні точки –

експериментальні результати при використанні осцилографа; червоні точки – результати вимірювань міліамперметром.

Рисунок 2 – Залежність індукції магнітного поля від відстані до котушки.

Струми в індуктивно пов'язаних контурах визначаються рівняннями

$$-M \frac{dI_1}{dt} - L_2 \frac{dI_2}{dt} = Z_2 I_2, \quad (1)$$

$$-M \frac{dI_2}{dt} - L_1 \frac{dI_1}{dt} = Z_1 I_1 + u_g, \quad (2)$$

де Z_1, Z_2 – імпеданси котушок 1 і 2; L_1, L_2 – їх індуктивності; M – коефіцієнт взаємної індукції. Представляючи залежність від часу множником $e^{i\omega t}$, перетворюємо рівняння (1) і (2) до вигляду

$$i\omega M I_1 + (Z_2 + i\omega L_2) I_2 = 0, \quad (3)$$

$$(Z_1 + i\omega L_1) I_1 + i\omega M I_2 = -u_g. \quad (4)$$

Вимірюваний сигнал в індикаторній котушці створюється зміною магнітного потоку $\Phi = M I_1$, але значення I_1 різне в присутності індикаторної котушки і без неї. Індикаторна котушка не викривляє результати виміру поля, коли струм I_2 настільки малий, що ним можна знехтувати (див. рівняння (4)). З рівняння (3) отримуємо:

$$I_2 = \frac{-i\omega \Phi}{Z_2 + i\omega L_2}. \quad (5)$$

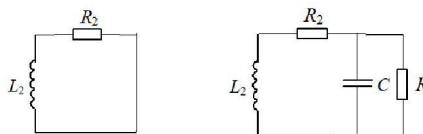
Для частоти генератора $\nu = 1,5$ кГц, яка використовується в роботі, на рис. 3 наведені еквівалентні схеми котушки 2 при вимірюванні міліамперметром (а) і при використанні осцилографу (б). На рисунку позначено: R_2 – омичний опір котушки, C, R – вхідна ємність і вхідний опір осцилографу. Опір міліамперметра вважається набагато меншим за опір котушки і тому в схемі а не врахований.

Імпеданс схеми а дорівнює

$$Z_{2a} = R_2 + i\omega L_2, \quad (6)$$

імпеданс схеми б

$$Z_{2b} = R_2 + i\omega L_2 + \frac{R(1-i\omega RC)}{1+\omega^2 R^2 C^2}. \quad (7)$$



а

б

а – міліамперметр; б – осцилограф.

Рисунок 3 – Еквівалентні схеми індикаторної котушки при підключенні міліамперметра і осцилографу.

У роботі використовується осцилограф С1-73, вхід Y якого має характеристики $C = 35$ пФ, $R = 1$ МОм. Для оцінки внеску осцилографа в імпеданс зробимо розрахунки:

$$\omega RC = 2\pi \cdot 1,5 \cdot 10^3 \cdot 10^6 \cdot 35 \cdot 10^{-12} = 0,33, \quad \omega^2 R^2 C^2 = 0,11. \quad (8)$$

Бачимо, що осцилограф додає до активної і реактивної частини імпедансу індикаторної котушки величини порядку R . Оскільки $R \gg R_2$, $R \gg \omega L_2$, з формули (5) випливає, що амплітудне значення струму I_2 набагато менше при використанні осцилографа, ніж при вимірюваннях міліамперметром. Зважаючи на згаданий вище вплив струму в індикаторній котушці на якість вимірювання поля, приходимо до висновку, що при використанні міліамперметра узгодження результатів вимірювань з розрахунками за формулою Біо-Савара-Лапласа гірше, що і демонструє рис. 2.