DOI: 10.30888/2415-7538.2018-09-1-035

УДК 621.3

FEATURES OF EDDY CURRENTS IN METAL DISCS
ОСОБЛИВОСТІ ВИХРОВИХ СТРУМІВ У МЕТАЛЕВИХ ДИСКАХ

Hutsul O.V. / Гуцул О.В.
c.ph.-m.s., assistant / к.фіз.-мат.н., асистент
ORCID: 0000-0003-0622-8084
Higher State Educational Establishment of Ukraine «Bukovinian State Medical University»,Chernivtsi, Theatralna sq. 2, 58002
ВДНЗУ "Буковинський державний медичний університет", Чернівці, пл. Театральна 2, 58002
Slobodyan V.Z. / Слободян В.З.
c.ph.-m.s., as.prof. / к.фіз.-мат.н., доцент
ORCID: 0000-0002-5396-4765
Chernivtsi department of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Chernivtsi, Golovna st. 203-a, 58000
Чернівецький факультет Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут» м. Чернівці, вул Головна 203-а, 58000

Аннотация. *У роботі розглянуто безелектродні дослідження вихрових струмів в циліндрі із дисків в однорідному магнітному полі соленоїда, який є частиною коливального контуру в області частот 1,3 – 4,8 MHz. Виявлено існування двох типів поверхневих вихрових струмів в металевому диску, що дозволило розрахувати частотні залежності добротності коливального контуру в циліндрі із будь-яким числом дисків. Пояснено експериментальні лінійні частотні залежності додаткового опору коливального контуру і лінійне зменшення індуктивності соленоїда із ростом числа дисків в циліндрі.*

Ключевые слова: *вихрові струми, добротність, індуктивність, безелектродні вимірювання, диски, циліндр, частотні залежності*

Вступ.

Безелектродні дослідження питомих електрофізичних характеристик матеріалів відіграють важливу роль в сучасному світі, особливо в області діагностики та технологічного контролю і мають широке застосування в медицині, електротехніці, криміналістиці. Значний інтерес представляють дослідження взаємодії вихрових струмів в електропровідних об'єктах, які відбуваються за посередництвом змінних магнітних полів. В якості об'єкта дослідження в даній роботі були вибрані циліндри із металевих дисків які поміщались в середину соленоїда, який є частиною послідовного коливального контуру. Експериментально досліджувались частотні залежності добротності коливального контуру і індуктивності соленоїда при наявності і відсутності в його середині циліндра із різного числа дисків.

Основний текст

Вихрові струми I_2 виникають в електропровідному середовищі, яке характеризується питомою електропровідністю σ_2, при наявності змінного в часі електричного поля , згідно закону Ома в диференційній формі. Вихрове електричне поле виникає, згідно теорії Максвела, внаслідок зміни з часом магнітного поля, яке по своїй природі є завжди вихровим і характеризується індукцією магнітного потоку. Однорідне в просторі магнітне поле можна

створити в середині соленоїда, по виткам якого протікає струм. Тому для дослідження поведінки вихрових струмів в циліндрі із деякого числа металевих дисків був вибраний соленоїд коливального контуру, в середині якого розміщувався циліндр із дисків. Соленоїд становить частину послідовного коливального контуру експериментальної установки [1-2], в якій досліджувались частотні залежності добротності Q та індуктивності L_1 при резонансі, який виникав при зміні частоти f високочастотного генератора та налаштуванні відповідної ємності C_1 зразкового змінного конденсатора по методикам, описаним в роботах [3-4].

Взаємодія індукованих струмів дисків із змінним струмом соленоїда відбувається через магнітне поле завдяки явищу взаємоіндукції та самоіндукції струмів. В результаті, взаємодія струмів I_2 циліндра із струмом I_1 соленоїда описується системою двох рівнянь:

$$\left.\begin{aligned} u_1 &= L_1\frac{dI_1}{dt} - M\frac{dI_2}{dt} + R_1 I_1 \\ 0 &= L_2\frac{dI_2}{dt} - M\frac{dI_1}{dt} + R_2 I_2 \end{aligned}\right\}. \qquad (1)$$

Для напруги і струмів, які змінюються по гармонічному закону із частотою f систему (1) можна записати в комплексному вигляді:

$$\left.\begin{aligned} \dot{u}_1 + j\omega M\dot{I}_2 &= z_1\dot{I}_1 \\ j\omega M\dot{I}_1 &= z_2\dot{I}_2 \end{aligned}\right\}, \qquad (2)$$

де $z_1=R_1 + j\omega L_1$, $z_2=R_2 + j\omega L_2$.

Підставивши струм I_2 із другого рівняння в перше отримаємо:

$$z = j\omega L_C + R_C, \qquad (3)$$

де

$$L_C = L_1 - \frac{\omega^2 M^2 L_2}{\omega^2 L_2^2 + R_2^2}; \qquad (4)$$

$$R_o = R_C - R_1 = \frac{\omega^2 M^2 R_2}{\omega^2 L_2^2 + R_2^2}; \qquad (5)$$

$$Q = \frac{\omega L_C}{R_C}. \qquad (6)$$

Експериментально досліджено залежності добротності коливального контуру від частоти для різного числа дисків (рис.1). Кружечками показано експериментальні дані, а суцільними кривими – теоретичні дані, розраховані в наближенні лінійної залежності додаткового опору R коливального контуру із дисками від частоти f.

Отримано експериментальні залежності індуктивності соленоїда від числа дисків в циліндр (рис.2). Кружечками показано експериментальні дані, а суцільними прямими – теоретично оброблені дані, одержані із умови мінімуму середньо квадратичного відхилення.

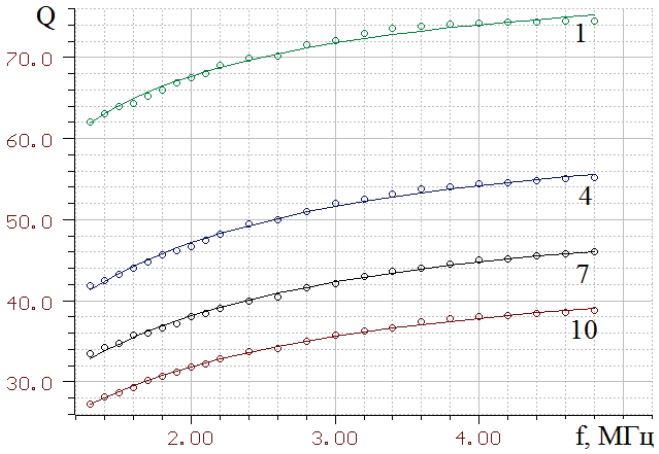

Рис. 1. Залежність добротності *Q* коливального контуру від частоти *f* при наявності в середині котушки індуктивності металевого циліндру, що складається із 1, 4, 7 та 10 однакових дисків

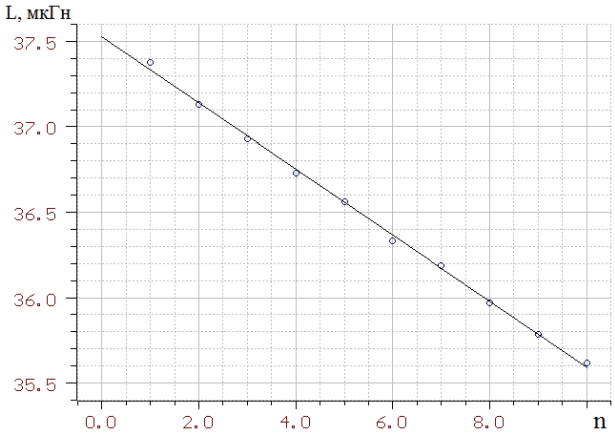

Рис. 2. Залежність індуктивності коливального контуру *L* від числа дисків металевого циліндру *n*, що знаходиться в середині котушки

Використовуючи експериментальні значення Q і L_c можна по формулі (6) знайти R_c і згідно формули (5) побудувати частотні залежності додаткового опору R_d коливального контуру для різного числа дисків в циліндрі (рис.3). Кружечками показано експериментальні дані, а суцільними прямими – теоретично оброблені дані, одержані із умови мінімуму середньо квадратичного відхилення.

Одержано лінійні залежності індуктивності L_c (рис.2) та лінійні частотні залежності додаткового опору R_d коливального контуру (рис.3) можна пояснити використовуючи наступні наближення:

1. $R_2 >> \omega L_2$, тоді формули (4, 5) матимуть такий вигляд:

$$L_C = L_1 - \frac{\omega^2 M^2 L_2}{R_2^2} \tag{7}$$

$$R_o = \frac{\omega^2 M^2}{R_2} \tag{8}$$

2. $R_2 = R_{20}\ (1 + \beta\omega) \approx R_{20}\beta\omega$, тоді формули (7, 8) дістануть вигляд, який добре узгоджується з результатом експериментальних досліджень:

$$L_C = L_1 - \frac{M^2 L_2}{R_{20}^2 \beta^2} \quad (9)$$

$$R_д = \omega \frac{M^2}{R_{20} \beta} \quad (10)$$

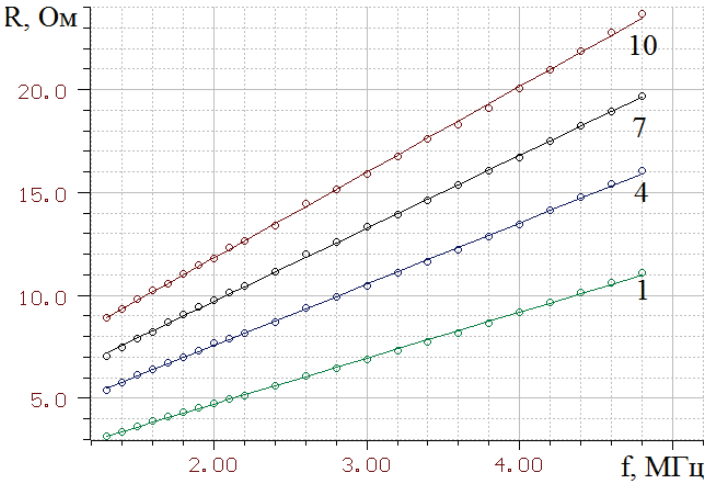

Рис. 3. Залежність додаткового опору від частоти для коливального контуру, в середині котушки індуктивності якого знаходиться металевий циліндр, складений із 1,4,7 та 10 дисків

Отримано залежності додаткового опору коливального контуру від числа дисків в циліндрі для ряду резонансних частот (рис.4). Кружечками показано експериментальні дані, а суцільними прямими – теоретично оброблені дані, одержані із умови мінімуму середньо квадратичного відхилення.

В лінійному наближенні залежності додаткового опору коливального контуру від числа n дисків мають вигляд:

$$R_д = R_a + R_b \cdot n, \quad (11)$$

Можна окремо виділити два типи поверхневих вихрових струмів в металевому диску: 1. I_a – сума поверхневих вихрових струмів двох площин диску. 2. I_b – поверхневий вихровий стум бічної поверхні диску. Побудовано частотні залежності додаткових опорів коливального контуру для двох типів поверхневих вихрових струмів (рис.5). Кружечками показано експериментальні дані, а суцільними прямими – теоретично оброблені дані, одержані із умови мінімуму середньо квадратичного відхилення.

При заміні одного диску двома однаковими металевими дисками вихрові струми в площинах дисків, що доторкаються між собою само ліквідовуються, оскільки дані поверхні стають внутрішніми, де вихрові струми відсутні в розглянутій області частот із-за прояву скін-ефекту в провідниках на високих частотах. Тому додатковий опір коливального контуру R_a викликаний поверхневими вихровими струмами двох площин циліндра із будь-яким числом дисків лишається незмінним. Додатковий опір R_b коливального контуру викликаний поверхневими вихровими струмами бічної поверхні циліндра прямо пропорційний числу дисків. Тому знаючи частотні залежності двох

компонентів додаткового опору коливального контуру з одним диском (рис. 5), можна розрахувати додатковий опір і добротність коливального контуру з циліндром із будь-яким числом дисків.

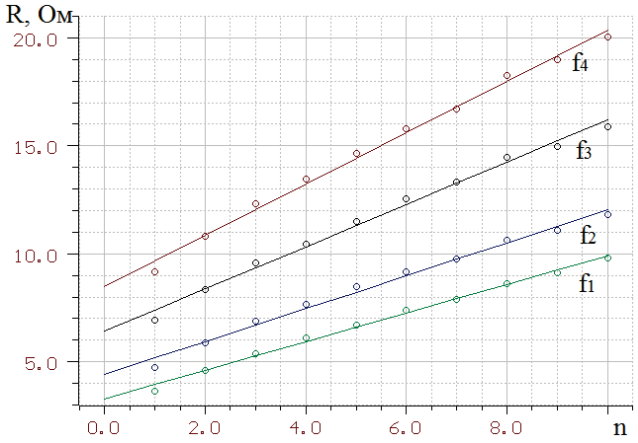

Рис. 4. Залежність додаткового опору *R* коливального контуру від числа *n* металевих дисків в циліндрі, що знаходиться в середині котушки індуктивності для чотирьох фіксованих частот: f_1=1.5 MHz, f_2=2.0 MHz, f_3=3.0 MHz і f_4=4.0 MHz

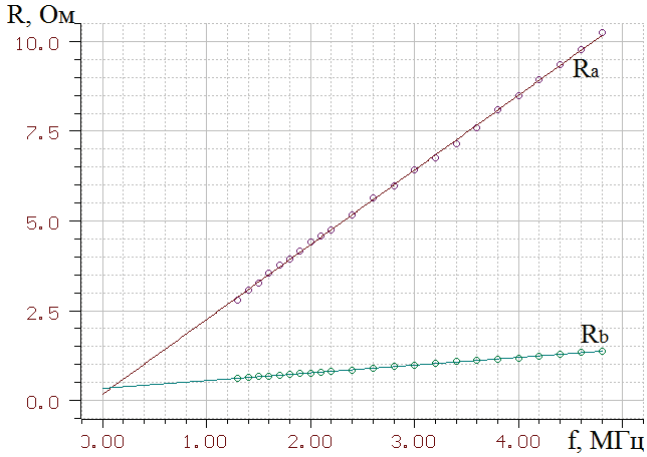

Рис. 5. Залежності додаткових опорів R_a і R_b від частоти f для коливального контуру, викликані двома типами вихрових струмів в циліндрі із одного диску, які протікають відповідно у двох торцевих площинах та бічній поверхні циліндру.

Заключення та висновки

Було розглянуто причини лінійної частотної залежності додаткового опору коливального контуру для циліндра із металевими дисками. Експериментально показано і теоретично підтверджено, що із збільшенням числа дисків в циліндрі індуктивність соленоїда лінійно зменшується із збільшенням числа дисків і не залежить від частоти. Запропоновано метод розділення двох типів поверхневих вихрових струмів в металевому диску, що дозволило теоретично розрахувати частотні залежності добротності коливального контуру для циліндру із будь-яким числом дисків в однорідному магнітному полі соленоїда.

Литература:

1. Gutsul O.V., Slobodian V.Z. Skin-effect of fluid la capillaries // Sworld Journal. – 2016, –№ 11, vol. 10. – p. 44-47.
2. Гуцул О.В., Слободян В.З. Особливості дослідження скін-ефекту рідин в капілярах. Збірник центру наукових публікацій «Велес» за матеріалами міжнародної науово-практичної конференції: «Зимові наукові читання», 1 частина – К.:Центр наукових публікацій, 2016. – С.9-14.
3. Гуцул О.В., Слободян В.З. Дослідження частотної залежності скін-ефекту для провідників 1-го та 2-го роду. Zbior artykulow naukowych. Konferencji Miedzynarodowej Naukowo-praktycznej “ Inzynieria iTechnologia . Teoretyczne I praktyczne Aspekty rozwoju wspolezesnej Nayki“ Czestochowa (PL) 30.03.2017-31.03.2017. Wydawca: Sp zo.o. “Diamond trading tour ”. 2017. C. 42 – 46.
4. Гуцул О.В., Слободян В.З. Вплив фериту і коротко замкнутих витків на частотні залежності добротності коливального контуру. // Научный взгляд в будущее. – Выпуск 6. Том 5. – 2017. – С. 81 – 85.

Abstract. *In this paper, electrodeless studies of eddy currents in a cylinder from disks in a homogeneous magnetic field of a solenoid are considered, which is part of the oscillatory circuit in the frequency range 1.3 - 4.8 MHz. The existence of two types of surface eddy currents in a metal disk was found, which allowed to calculate the frequency dependences of the Q-factor of the oscillatory circuit in a cylinder with any number of disks. The experimental linear frequency dependences of the additional resistance of the oscillatory circuit and the linear reduction of the solenoid inductance with increasing number of disks in the cylinder are explained.*

As a research object in this work, cylinders from metal disks were placed in the middle of the solenoid, which is part of a sequential oscillatory circuit. The frequency dependences of the Q-factor of the oscillatory circuit and the inductance of the solenoid in the presence and absence of a cylinder in a different number of discs were experimentally investigated experimentally.

The reasons of the linear frequency dependence of the additional resistance of the oscillatory circuit for a cylinder with metal discs are considered. Experimentally shown and theoretically proved that with increasing number of disks in a cylinder, the inductance of a solenoid decreases linearly with an increase in the number of disks and does not depend on the frequency. The method of separating two types of surface vortex currents in a metal disk is proposed, which allowed theoretically to calculate the frequency dependences of the quality factor of the oscillatory circuit for a cylinder with any number of disks in a homogeneous magnetic field of a solenoid.

Key words: *eddy currents, quality factor, inductance, electrodeless measurements, disks, cylinder, frequency dependence*

References:

1. Gutsul O.V., Slobodian V.Z. Skin-effect of fluid la capillaries // Sworld Journal. – 2016, -№11, vol.10. –p.44-47.
2. Gucul O.V., Slobodjan V.Z. Doslidzhennja chastotnoi' zalezhnosti skin-efektu dlja providnykiv 1-go ta 2-go rodu. Zbior artykulow naukowych. Konferencji Miedzynarodowej Naukowo-praktycznej “ Inzynieria iTechnologia . Teoretyczne I praktyczne Aspekty rozwoju wspolezesnej Nayki“ Czestochowa (PL) 30.03.2017-31.03.2017. Wydawca: Sp zo.o. “Diamond trading tour ”. 2017. C. 42 – 46.
3. Gucul O.V., Slobodjan V.Z. Osoblyvosti doslidzhennja skin-efektu ridyn v kapiljarah. Zbirnyk centru naukovyh publikacij «Veles» za materialamy mizhnarodnoi' nauovo-praktychnoi' konferencii': «Zymovi naukovi chytannja», 1 chastyna – K.:Centr naukovyh publikacij, 2016. – S.9-

14.

4. Gucul O.V., Slobodjan V.Z. Vplyv ferytu i korotko zamknutyh vytkiv na chastotni zalezhnosti dobrotnosti kolyval'nogo konturu. // Nauchnyj vzgljad v budushhee. –V. 6. T. 5. - 2017. - S. 81 – 85.

Стаття вітправлена: 7.04.2018 р.

© Гуцул О.В.

Рецензент: д.фіз.-мат.н., проф. Катеринчук В.М.