



Бржезицький В. О.,
Гаран Я. О.,
Лапоша М. Ю.

РОЗПОДІЛЕННЯ ІНДУКОВАНОГО ПОТЕНЦІАЛУ В СОЛЕНІДАЛЬНІЙ КОТУШЦІ

В статті проведено дослідження індукованого магнітним полем потенціалу для соленоїдальної котушки з рівномірним розподілом витків з використанням розрахункового методу. Показані основні закономірності, пов'язані з розподіленням індукованого потенціалу в соленоїдальній котушці. Визначені умови, необхідні для досягнення високої стабільності характеристик котушки в широкому діапазоні частот.

Ключові слова: соленоїдальна котушка, індукований потенціал, високочастотний загороджувач, генерування радіозавод.

1. Вступ

Котушка індуктивності — один із основних конструктивних елементів високочастотних загороджувачів, які необхідні для створення високочастотних каналів зв'язку по високовольтних повітряних лініях для забезпечення передачі сигналів протиаварійної автоматики, релейного захисту, телемеханіки, промодульованих високою частотою (24–1000 кГц), по фазовому проводу або грозотросу [1].

Також, одним з призначень котушок індуктивності є їх використання в установках для випробування ізоляторів на допустимий рівень радіозавод [2]. В останній час до таких випробувань приділяється значна увага у зв'язку з зростанням ролі питань екологічних вимог та захисту навколишнього середовища.

Існуюче високовольтне електрообладнання та норми випробування ізоляторів на допустимий рівень радіозавод є недостатньо чутливими внаслідок недосконалості високочастотних фільтрових загороджувачів, використовуваних у випробувальному обладнанні [3].

Тому при переході на виробництво високовольтних ізоляторів за сучасними стандартами [4] необхідно забезпечувати удосконалення високовольтного електрообладнання для випробувань ізоляторів на допустимий рівень радіозавод та підвищення його чутливості.

В зв'язку з цим виникає задача дослідження високочастотних котушок індуктивності на основі розрахунку розподілення електричних та магнітних полів в їх елементах.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Котушка індуктивності є невід'ємним елементом високочастотних загороджувачів, які в теперішній час випускаються рядом зарубіжних фірм-виробників. Наприклад, фірма Siemens [5] пропонує високочастотні загороджувачі, котушки індуктивності яких виконані у герметичному (закритому) або відкритому вигляді, і застосовуються в стандартизованому діапазоні потужності. При великих значеннях індуктивності та великих струмах краще застосовувати герметичні котушки.

У герметичних котушках використовується алюмінієвий провід або кабель, в котушках відкритого типу використовується алюмінієва смуга, всі струмопровідні елементи мають зварні з'єднання.

Автори [6] запропонували методи розрахунку плоских та соленоїдальних котушок мінімальних розмірів (від 1 до 5 мм) для використання в твердотільних зондах апаратури ядерного магнітного резонансу при частотах 300 та 600 МГц.

В [7] описується застосування соленоїдальних котушок для безелектродного підпалювання люмінесцентних ламп.

В публікації [8] розглядається застосування феритових осердь у соленоїдальних котушках для їх використання в якості датчиків зі зменшеними рівнями шумів.

Автори [9] досліджували скін-ефект в багат шарових соленоїдальних котушках та показали, що він проявляється більш інтенсивно у внутрішніх шарах котушок.

Автори досліджень радіочастотної котушки для магнітно-резонансного томографу [10] дослідили вплив втрат енергії в діелектричному зразку та порівняли їх з втратами від вихрових струмів і спрогнозували власну ємність котушки, в залежності від її геометричних параметрів, а також отримали серію експериментальних підтверджень розрахункам.

В публікації [11] представлений підхід для розрахунку взаємної та власної індуктивності модульної тороїдальної котушки, яка складається з декількох соленоїдальних котушок, з'єднаних послідовно, з використанням рівнянь Неймана та Біо-Савара. Даний підхід може бути використаний для розрахунку взаємної та самоіндукції між двома кільцями модульної тороїдальної котушки в трьох вимірах.

Автори [12] приводять порівняння методів зменшення потужності розсіювання при нагріванні провідних зразків з використанням пасивних провідників в соленоїдальній котушці. Для цього були проведені числові розрахунки розподілення магнітного та магнітно-індукованого полів для оцінки впливу пасивних провідників за допомогою методу кінцевих різниць Максвелла. Проведені моделювання в [12] показують, що деякі конструкції соленоїдальної котушки можуть мати суттєво меншу робочу температуру, порівняно з іншими.

Дослідження розподілення індукваного потенціалу розглянуто в [13], де автори пропонують метод вибору геометрії котушок індуктивності для забезпечення рівномірного розподілення індукваного потенціалу. Також в цій статті автори наводять приклади розрахунку параметрів котушок з рівномірним розподіленням індукваного потенціалу для різної кількості витків.

Огляд досліджень авторів у [5–13] показав, що в цих роботах не приділено достатньої уваги теоретичним розрахункам характеристик високочастотних котушок індуктивності на основі узгодження розподілення індукваного магнітного поля та електричного потенціалів у просторі, хоча базові основи для таких розрахунків викладені авторами в [13]. В зв'язку з цим, запропоноване дослідження розподілення індукваного потенціалу в соленоїдальній котушці є актуальним.

3. Об'єкт, ціль та задачі дослідження

Об'єкт дослідження – індукований магнітним полем потенціал в соленоїдальній котушці.

Метою даного дослідження є визначення розподілення індукваного потенціалу в соленоїдальній котушці. Для досягнення мети вирішувались наступні задачі:

- визначення індукваного потенціалу в соленоїдальній котушці;
- розрахунок його розподілення по висі котушки.

4. Метод дослідження розподілення індукваного потенціалу в соленоїдальній котушці

Для спрощення, котушку індуктивності будемо розглядати в соленоїдальному наближенні.

У дослідженні використовуємо модель соленоїдальної котушки (рис. 1), по однорідній обмотці якої протікає струм. Визначення індукваного потенціалу проводимо за допомогою формули взаємної індуктивності для двох однакових кругових контурів A та B , які розташовані в паралельних площинах так, що їх центри знаходяться на одній висі z [14]:

$$M = \mu_0 R f(k), \quad (1)$$

де R – радіус контурів, $f(k) = \left(\frac{2}{k} - k \right) K - \frac{2}{k} E$, K та E – повні еліптичні інтеграли першого та другого роду з модулем $k = \sqrt{\frac{4R^2}{h^2 + 4R^2}}$, h – відстань між контурами. Значення K та E можуть бути знайдені за формулами (2), (3) [15]:

$$K = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \cdot \sin^2(\beta)}} d\beta, \quad (2)$$

$$E = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \cdot \sin^2(\beta)} d\beta. \quad (3)$$

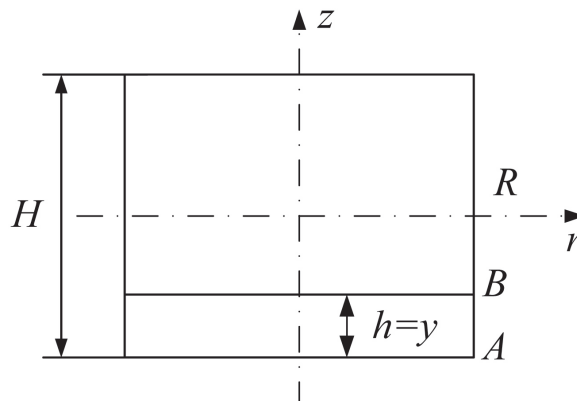


Рис. 1. Розрахункова модель соленоїдальної котушки

Після приведення формули (1) до безрозмірного вигляду ($h = y$, $y = \alpha R$) отримаємо:

$$\frac{M}{R\mu_0} = F(\alpha) = \left(\frac{\alpha^2 + 2}{\sqrt{\alpha^2 + 4}} \right) \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \cdot \sin^2(\beta)}} d\beta - \sqrt{\alpha^2 + 4} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \cdot \sin^2(\beta)} d\beta, \quad (4)$$

$$\text{де } k = \sqrt{\frac{4}{\alpha^2 + 4}}.$$

Розглянемо, як приклад, «рівносторонній» соленоїд з загальною висотою $H = 2R$.

Допустимо, що в соленоїдальній котушці протікає струм $i = I_m \cdot \sin \omega t$, а кількість витків котушки $N \gg 1$. Необхідно визначити розподілення індукваного потенціалу в котушці в залежності від висоти y , $0 \leq y \leq 2R$. Оскільки $y = \alpha R$, досліджуємо залежність індукваного потенціалу $\varphi = \varphi(\alpha)$.

Виділимо на відстані h' шар витків dh' , який містить кількість витків $dN' = dh' \frac{N}{H}$. Тоді у цьому шарі індукується напруга:

$$d\varphi = \pm dh' \frac{N}{H} \cdot \omega \int_0^H \frac{N}{H} I_m \cdot \cos \omega t \cdot M(h', y) = \pm \omega \cdot dh' \frac{N^2}{H^2} I_m \cdot \cos \omega t \int_0^H M(h', y) dy, \quad (5)$$

де $\int_0^H M(h', y) dy = \Phi(h')$, а знак «+» або «-» обирається виходячи із заданого позитивного напрямку струму в котушці.

Індукований потенціал в котушці φ в цілому тоді визначаємо з (5) як $\varphi = \sum d\varphi$:

$$\varphi = \pm \omega \frac{N^2}{H^2} I_m \cdot \cos \omega t \int_0^H \Phi(h') dh', \quad (6)$$

а його розподілення по висоті h' визначається виразом:

$$\varphi(h') = \pm \omega \frac{N^2}{H^2} I_m \cdot \cos \omega t \int_0^{h'} \Phi(h') dh' \quad (7)$$

Розглянемо в (5) інтеграл:

$$\Phi(h') = \int_0^H M(h', y) dy.$$

Проводячи в ньому підстановку $h' = y' = \alpha'R$, $y = \alpha R$, замість (4) одержимо:

$$\begin{aligned} \frac{M(h', y)}{R\mu_0} = F(\alpha', \alpha) &= \frac{(\alpha' - \alpha)^2 + 2}{\sqrt{(\alpha' - \alpha)^2 + 4}} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \cdot \sin(\beta)^2}} d\beta - \\ &- \sqrt{(\alpha' - \alpha)^2 + 4} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \cdot \sin(\beta)^2} d\beta, \end{aligned} \quad (8)$$

де $k = \frac{\sqrt{4}}{\sqrt{(\alpha' - \alpha)^2 + 4}}$.

Тоді:

$$\Phi(\alpha') = \mu_0 R^2 \int_0^{\alpha_{\max}} F(\alpha', \alpha) d\alpha, \quad (9)$$

де $\alpha_{\max} = \frac{H}{R}$.

Одержаний за (9) графік залежності $\frac{\Phi(\alpha')}{\mu_0 R^2}$ від α' представлений на рис. 2.

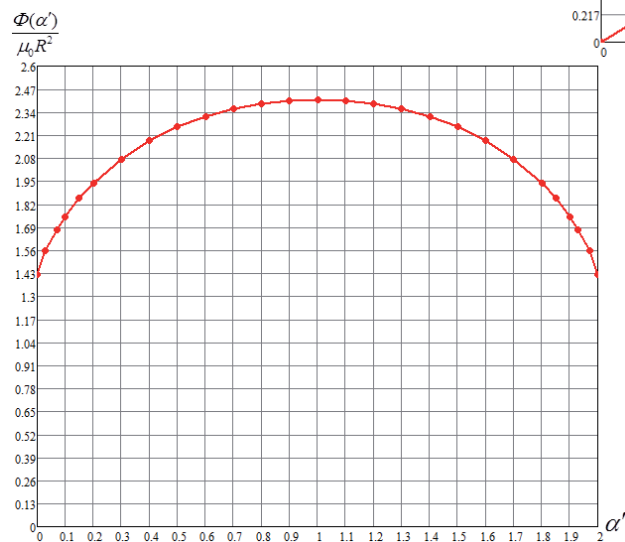


Рис. 2. Графік залежності $\frac{\Phi(\alpha')}{\mu_0 R^2}$ від α'

Мінімальне значення $\frac{\Phi(\alpha')}{\mu_0 R^2}$ відповідає значенням $\alpha' = 0$; $\alpha' = 2,0$ і складає 1,42392. Максимальне значення $\frac{\Phi(\alpha')_{\max}}{\mu_0 R^2}$ відповідає значенню $\alpha' = 1,0$ і складає 2,41208. Функція $\frac{\Phi(\alpha')}{\mu_0 R^2}$ монотонно змінюється від мінімального до максимального значень, і має екстремум в точці $\alpha' = 1,0$.

На основі (7) визначимо залежність:

$$\varphi(\alpha') = \pm \mu_0 \cdot \omega \frac{N^2}{H^2} R^3 I_m \cdot \cos \omega t \int_0^{\alpha'} \Phi(\alpha') d\alpha'.$$

Введемо функцію $\psi(\alpha') = \int_0^{\alpha'} \Phi(\alpha') d\alpha'$ та представимо її вид на рис. 3. Функція $\psi(\alpha')$ була побудована по даним рис. 2 за допомогою використання розрахункового методу трапецій [16].

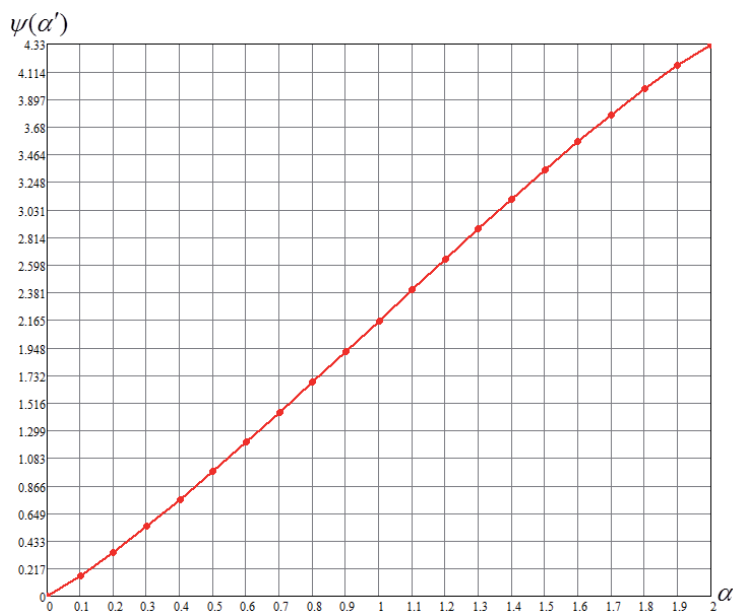


Рис. 3. Графік залежності функції $\psi(\alpha')$

Аналіз залежності функції ψ від α' на рис. 3 показує, що вона має нелінійний характер.

5. Результати розрахунків розподілення індукованого потенціалу в соленоїдальній котушці

В результаті проведення серії розрахунків при значеннях $\alpha_{\max} = 0,1; 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0; 8,0; 16,0; 32,0; 100,0$ були одержані дані, аналогічні за змістом тим, що містяться на рис. 2. Результати розрахунків наведені в табл. 1 та представлені на рис. 4.

Графічні залежності функції $\frac{\Phi(\alpha')}{\Phi(\alpha')_{\max}}$ від $\frac{\alpha'}{\alpha_{\max}}$, згідно табл. 1, представлено на рис. 4.

Таблиця 1

Результати розрахунків функції $\frac{\Phi(\alpha')}{\Phi(\alpha')_{\max}}$ від $\frac{\alpha'}{\alpha_{\max}}$ для різних значень α_{\max}

№	$\alpha_{\max} \rightarrow$	0,1	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	32,0	100,0
1	$\frac{\Phi(\alpha')}{\Phi(\alpha')_{\max}}$ при $\frac{\alpha'}{\alpha_{\max}} = 0,0$	0,8304	0,7838	0,7323	0,6643	0,5903	0,5358	0,5108	0,5029	0,5007	0,5001
2	$\frac{\Phi(\alpha')}{\Phi(\alpha')_{\max}}$ при $\frac{\alpha'}{\alpha_{\max}} = 0,1$	0,9100	0,8856	0,8593	0,8274	0,8036	0,8169	0,8751	0,9411	0,9802	0,9977
3	$\frac{\Phi(\alpha')}{\Phi(\alpha')_{\max}}$ при $\frac{\alpha'}{\alpha_{\max}} = 0,2$	0,9529	0,9402	0,9266	0,9110	0,9026	0,9193	0,9566	0,9846	0,9957	0,9995
4	$\frac{\Phi(\alpha')}{\Phi(\alpha')_{\max}}$ при $\frac{\alpha'}{\alpha_{\max}} = 0,3$	0,9799	0,9745	0,9687	0,9624	0,9599	0,9693	0,9856	0,9954	0,9988	0,9998
5	$\frac{\Phi(\alpha')}{\Phi(\alpha')_{\max}}$ при $\frac{\alpha'}{\alpha_{\max}} = 0,4$	0,9951	0,9938	0,9924	0,9908	0,9904	0,9929	0,9969	0,9991	0,9998	0,9999
6	$\frac{\Phi(\alpha')}{\Phi(\alpha')_{\max}}$ при $\frac{\alpha'}{\alpha_{\max}} = 0,5$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
7	$\frac{\Phi(\alpha')}{\Phi(\alpha')_{\max}}$ при $\frac{\alpha'}{\alpha_{\max}} = 0,6$	0,9951	0,9938	0,9924	0,9908	0,9904	0,9929	0,9969	0,9991	0,9998	0,9999
8	$\frac{\Phi(\alpha')}{\Phi(\alpha')_{\max}}$ при $\frac{\alpha'}{\alpha_{\max}} = 0,7$	0,9799	0,9745	0,9687	0,9624	0,9599	0,9693	0,9856	0,9954	0,9988	0,9998
9	$\frac{\Phi(\alpha')}{\Phi(\alpha')_{\max}}$ при $\frac{\alpha'}{\alpha_{\max}} = 0,8$	0,9529	0,9402	0,9266	0,9110	0,9026	0,9193	0,9566	0,9846	0,9957	0,9995
10	$\frac{\Phi(\alpha')}{\Phi(\alpha')_{\max}}$ при $\frac{\alpha'}{\alpha_{\max}} = 0,9$	0,9100	0,8856	0,8593	0,8274	0,8036	0,8169	0,8751	0,9411	0,9802	0,9977
11	$\frac{\Phi(\alpha')}{\Phi(\alpha')_{\max}}$ при $\frac{\alpha'}{\alpha_{\max}} = 1,0$	0,8304	0,7838	0,7323	0,6643	0,5903	0,5358	0,5108	0,5029	0,5007	0,5001

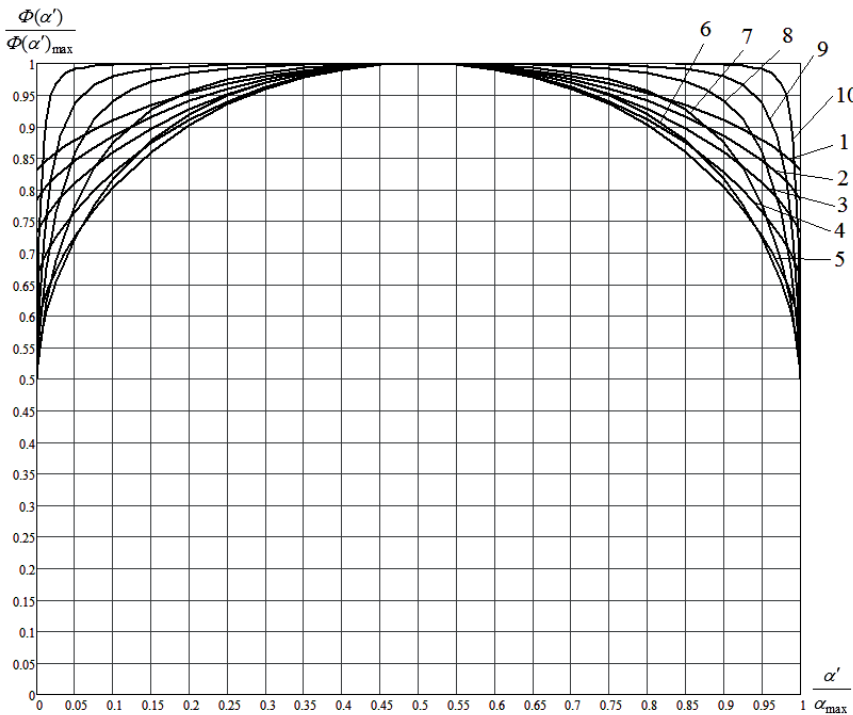


Рис. 4. Графік залежності функції $\frac{\Phi(\alpha')}{\Phi(\alpha')_{\max}}$ від $\frac{\alpha'}{\alpha_{\max}}$ при значеннях α_{\max} : 1 — $\alpha_{\max} = 0,1$; 2 — $\alpha_{\max} = 0,25$; 3 — $\alpha_{\max} = 0,5$; 4 — $\alpha_{\max} = 1$; 5 — $\alpha_{\max} = 2$; 6 — $\alpha_{\max} = 4$; 7 — $\alpha_{\max} = 8$; 8 — $\alpha_{\max} = 16$; 9 — $\alpha_{\max} = 32$; 10 — $\alpha_{\max} = 100$

6. Обговорення результатів дослідження розподілення індукваного потенціалу в соленоїдальній котушці

Як слідує із даних рис. 4 розподілення індукваного магнітним полем соленоїдальної котушки потенціалу по її довжині є суттєво нелінійним.

Граничні значення $\frac{\Phi(\alpha')}{\Phi(\alpha')_{\max}}$ для $\frac{\alpha'}{\alpha_{\max}} = 0,0$ (або 1,0) при збільшенні α_{\max} від 0,1 до 100,0 монотонно зменшуються від 0,8304 до 0,5001.

Проте, значення $\frac{\Phi(\alpha')}{\Phi(\alpha')_{\max}}$ при $\frac{\alpha'}{\alpha_{\max}} = 0,2$ (або 0,8) при збільшенні α_{\max} (від 0,1 до 2,0) спочатку зменшується від 0,9529 до 0,9026, а потім (зі зростанням α_{\max} від 4,0 до 100,0) збільшується від 0,9193 до 0,9995.

Таким чином, одержуємо складну залежність перерозподілу індукваного магнітним полем котушки потенціалу.

Одержані в статті результати можуть бути використані для побудови високочастотних котушок, значення індуктивності яких було б високостабільним в широкому діапазоні частот.

Для цього необхідно забезпечити відповідне регулювання електричного поля котушки та узгодження розподілення її електричного потенціалу з індукованим магнітним полем котушки потенціалом.

7. Висновки

1. Показано, що в соленоїдальній котушці з рівномірним розподілом витків розподілення індукваного магнітним полем котушки потенціалу є суттєво нерівномірним.

2. Наведений механізм пояснює причини нестабільності параметрів котушок індуктивності в залежності від частоти.

3. Для досягнення високої стабільності параметрів котушок індуктивності в широкому діапазоні частот необхідне узгодження розподілення електричного потенціалу котушки з індукованим потенціалом.

4. В подальшому одержані результати дозволять розглядати розподілення індукваного потенціалу в багатопровідних котушках.

Література

1. Микущий, Г. В. Високочастотная связь по линиям электропередачи [Текст]: учебник / Г. В. Микущий, В. С. Скитальцев. — М.: Энергия, 1977. — 2-е изд. — 440 с.
2. IEC 60437. Radio interference test on high-voltage insulators [Text]. — 1998. — 36 p. doi:10.3403/01268403
3. Costea, M. Radiofrequency disturbances radiated and injected in a power line by a high voltage equipment [Text] / M. Costea, I. Băran // Scientific Bulletin of the Electrical Engineering Faculty of the Polytechnic University of Bucharest. — 2010. — Vol. 12, № 1. — P. 77–83.
4. IEC 60383-1. Insulators for overhead lines with a nominal voltage above 1000 V. Part 1: Ceramic or glass insulator units for a. c. systems. Definitions, test methods and acceptance criteria [Text]. — 1996. — 111 p. doi:10.3403/00632514
5. Високочастотные заградители [Электронный ресурс]. — Режим доступа: \www/URL: http://www.energy.siemens.com/ru/pool/ru/Power-Transmission/Downloads/Line_trap_ru.pdf
6. Rainey, J. M. Estimation and measurement of flat or solenoidal coil inductance for radiofrequency NMR coil design [Text] / J. K. Rainey, S. J. DeVries, B. D. Sykes // Journal of Magnetic Resonance. — 2007. — Vol. 187, № 1. — P. 27–37. doi:10.1016/j.jmr.2007.03.016
7. Choi, Y.-S. Electromagnetic field distribution of electrodeless fluorescent lamps and analysis of electrical properties for solenoidal induction coil [Text] / Y.-S. Choi, J.-C. Lee, S.-H. Lee, D.-H. Park // Conference Paper published in Electromagnetic Materials. — 2005. — P. 171–174. doi: 10.1142/9789812701718_0041
8. Morrison, F. Ferrite-Cored Solenoidal Induction Coil Sensor for BUD (MM-1667) [Text] / F. Morrison, A. Becker, U. Conti, E. Gasperikova // Technical Report, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. — Berkeley, CA (US), 2011. — 26 p. doi:10.2172/1051526
9. Qiu, Y. Numerical calculation on multi-layers solenoidal coil [Text] / Y. Qiu, Q. Zhang, M. L. Zhang // Journal of IEEE Transactions on Magnetics. — 1993. — Vol. 29, № 2. — P. 1434–1437. doi:10.1109/20.250672
10. Harpen, M. D. Analysis of capacitive coupling and associated loss for a solenoidal magnetic resonance imaging radio-frequency coil [Text] / M. D. Harpen // Journal of Medical Physics. — 1989. — Vol. 16, № 2. — P. 234 doi:10.1118/1.596374
11. Pahlavani, M. R. A. Inductance comparison of the solenoidal coil of modular toroidal coils using the analytical and finite element method [Text] / M. R. A. Pahlavani, A. Shiri, H. A. Mohammadpour, A. Shoulaie // Journal of Progress In Electromagnetics Research B. — 2010. — Vol. 20. — P. 337–352. doi:10.2528/pierb10030907
12. Park, B. Faraday shields within a solenoidal coil to reduce sample heating: Numerical comparison of designs and experimental verification [Text] / B. Park, T. Neuberger, A. G. Webb, D. C. Bigler, C. M. Collins // Journal of Magnetic Resonance. — 2010. — Vol. 202, № 1. — P. 72–77. doi:10.1016/j.jmr.2009.09.023
13. Лапоша, М. Ю. Розробка котушок індуктивності з рівномірним розподіленням індукваного потенціалу [Текст] / М. Ю. Лапоша, С. В. Ващук // Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенергетики та автоматики». — Київ: Політехніка, 2014. — С. 331–332.
14. Калантаров, П. Л. Расчет индуктивности [Текст]: справочная книга / П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин. — 3-е изд. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. — 488 с.
15. Ильин, В. П. Численные методы решения задач электрофизики [Текст] / В. П. Ильин. — М.: Наука, 1985. — 336 с.
16. Демидович, Б. П. Основы вычислительной математики [Текст] / Б. П. Демидович, И. А. Марон. — М.: Наука, 1963. — 660 с.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУЦИРОВАННОГО ПОТЕНЦИАЛА В СОЛЕНОИДАЛЬНОЙ КАТУШКЕ

В статье проведено исследование индуцированного магнитным полем потенциала для соленоидальной катушки с равномерным распределением витков с использованием расчетного метода. Показаны основные закономерности, связанные с распределением индуцированного потенциала в соленоидальной катушке. Определены условия, необходимые для достижения высокой стабильности характеристик катушки в широком диапазоне частот.

Ключевые слова: соленоидальная катушка, индуцированный потенциал, высокочастотный заградитель, генерирование радиопомех.

Бржезицький Володимир Олександрович, доктор технічних наук, професор, виконавач обов'язків завідувача кафедри техніки і електрофізики високих напруг, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: brzhezitsky@mail.ru.

Гаран Ярослав Олександрович, інженер, кафедра техніки і електрофізики високих напруг, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.

Лапоша Микола Юрійович, аспірант, кафедра техніки і електрофізики високих напруг, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.

Бржезицький Володимир Олександрович, доктор технічних наук, професор, исполняющий обязанности заведующего кафедрой техники и электрофизики высоких напряжений, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.

Гаран Ярослав Александрович, инженер, кафедра техники и электрофизики высоких напряжений, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.

Лапоша Николай Юрьевич, аспирант, кафедра техники и электрофизики высоких напряжений, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.

Brzhezitskyi Volodymyr, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: brzhezitsky@mail.ru.

Haran Yaroslav, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine.

Laposh Mykola, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine