

УДК 621.318

doi:10.20998/2413-4295.2021.01.01

ПЛОСКИЙ КРУГОВИЙ СОЛЕНОЇД МІЖ МАСИВНИМИ БІФІЛЯРНИМИ КОТУШКАМИ. АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ

Ю. В. БАТИГІН, О. Ф. ЄРЬОМІНА*, С. О. ШИНДЕРУК, Є. О. ЧАПЛИГІН, Б. Е. БЕНСБАА

кафедра фізики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, УКРАЇНА
*e-mail: elena.yeryomina@gmail.com

АНОТАЦІЯ Представлено аналіз і чисельні оцінки індукційних ефектів в металі плоского кругового соленоїда, розташованого між гілками зовнішньої біфілярної котушки в плоскій індукторній системі, що збуджується односпрямованими струмами в обмотках біфіляра. Такий пристрій, конструктивне виконання якого вперше було запропоновано раніше авторами цієї роботи, може мати практичний інтерес для схем обладнання магнітно-імпульсної обробки металів. Застосування даної індукторної системи дає можливість мінімізувати вплив індукційних ефектів на електромагнітні процеси в металі внутрішнього індуктора. Отримано чисельні оцінки для індуктованих струмів, що збуджуються в металі внутрішнього кругового індуктора, розміщеного між зовнішніми обмотками біфілярної котушки. Показано, що в низькочастотному режимі діючих полів часова залежність струму, що збуджується, є похідна від часової залежності збуджуючого струму, а поперечний розподіл струму в металі внутрішнього індуктора являє собою лінійну залежність, що проходить через центральну вісь індуктора. У високочастотному режимі діючих полів часова залежність і радіальний розподіл струму, що збуджується, збігаються з відповідними аналогами для збуджуючого струму, а поперечний розподіл індуктованого струму має характер, властивий різкому поверхневому ефекту, коли індуктований струм витісняється на граничні поверхні металу. Доведено, що мінімальний вплив полів зовнішнього біфіляра на електромагнітні процеси у внутрішньому індукторі має спостерігатися в низькочастотному режимі, коли просторова суперпозиція різноспрямованих індуктованих струмів дає в сумі нульову величину електрорушійної сили індукції, що збуджується. Результати аналізу, здійсненого на основі проведених конкретних обчислень, спрямовані на пошук умов успішної технічної реалізації запропонованої індукторної системи. Вельми перспективним в напрямку наступних досліджень може бути створення працездатних моделей запропонованих індукторних систем і проведення експериментів по визначенню реальних умов їх максимальної ефективності.

Ключові слова: біфілярна котушка; індукторна система; електромагнітні процеси; односпрямовані струми; просторово-часова залежність; чисельні оцінки; розрахункова модель

FLAT CIRCULAR SOLENOID BETWEEN MASSIVE BIFILAR COILS. ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES

Yu. V. BATYGIN, O. YERYOMINA, S. SHINDERUK, E. CHAPLYGIN, B. E. BENSBAА

Department of Physics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT An analysis and numerical estimates of induction effects in the metal of a flat circular solenoid located between the branches of an external bifilar coil in a flat inductor system excited by unidirectional currents in the bifilar windings are presented. Such a device, the design of which was first proposed earlier by the authors of this work, is of practical interest for circuits of equipment for magnetic-pulse processing of metals. The use of the considered inductor system makes it possible to minimize the influence of induction effects on electromagnetic processes in the metal of the internal inductor. Numerical estimates are obtained for the induced currents excited in the metal of the inner circular inductor placed between the outer windings of the bifilar coil. It is shown that in the low-frequency mode of acting fields, the time dependence of the excited current is a derivative of the time dependence of the exciting current and the transverse distribution of the current in the metal of the internal inductor is a linear dependence passing through the central axis of the inductor. In the high-frequency regime of acting fields, the time dependence and the radial distribution of the excited current coincide with the corresponding analogs for the exciting current, and the transverse distribution of the induced current is characteristic of a sharp surface effect, when the induced current is displaced to the boundary surfaces of the metal. It is proved that the minimum influence of the fields of the external bifilar on the electromagnetic processes in the internal inductor should be observed in the low-frequency mode, when the spatial superposition of multidirectional induced currents adds up to the zero value of the excited electromotive force of induction. The results of the analysis based on the specific calculations performed are aimed at finding the conditions for the successful technical implementation of the proposed inductor system. The creation of workable models of the proposed inductor systems and experiments to determine the real conditions for their maximum efficiency are seen as very promising in the direction of subsequent research.

Keywords: bifilar coil, inductor system; electromagnetic processes; unidirectional currents; space-time dependence; numerical estimates; calculation model

Вступ

Біфілярні електротехнічні конструкції, або просто біфіляри, мають у наявності два паралельних провідника, струми в яких можуть протікати в одному

або протилежних напрямках. У першому випадку результуюче магнітне поле звертається в нуль у внутрішній порожнині між провідниками, у другому – нуль напруженості магнітного поля має місце в просторі поза провідниками. Зазначена особливість

біфілярів становить практичний інтерес для створення електротехнічних пристроїв, де індукційні ефекти повинні бути пригнічені, або, навпаки, посилені.

Короткий огляд літератури

Біфілярні котушки, як елементи електричних ланцюгів з низькими реактивними параметрами, представлені у відомому підручнику, що пережив кілька перевидань [1]. Не ігноруючи добре відомих застосувань біфілярів (малоіндуктивні омичні опори, обмотки імпульсних реле, блоки живлення в електроніці та ін.) [2], відзначимо сучасні області їх використання, такі, як розробки датчиків різного призначення, що дозволяють здійснити перетворення вимірюваного природного параметра в еквівалентний електричний сигнал [3]. Необхідно відзначити і досягнення в технологіях їх виробництва для промислового приладо- і електроапаратобудування [4].

Розвитку методів розрахунку характеристик електромагнітних процесів в соленоїдах, які виступають в якості джерел сильних полів для технологічних цілей і полів випромінювання в передавальних пристроях, присвячені роботи [5,6]. Із сучасних праць з розрахунками котушок різноманітної геометрії можна виділити наукову монографію [7], присвячену ефективним аналітичним і чисельним методам розрахунку характеристик електромагнітних процесів в елементних складових техніки сильних і надсильних полів.

Для схем обладнання магнітно-імпульсної обробки металів, описаних в [8], практичний інтерес представляють дослідження плоских індукторних систем, де багатовитковий соленоїд-індуктор розміщується між гілками біфілярної котушки. Тут слід зазначити опис аналогічних конструкцій в роботах [9,10]. Їх авторами була вперше запропонована і проаналізована дієвість біфілярної масивної котушки з внутрішнім плоским соленоїдом. Система збуджувалася односпрямованими струмами в гілках біфіляра. Його застосування мало за мету мінімізувати вплив індукційних ефектів на електромагнітні процеси в металі внутрішнього індуктора. Питання про реальні умови, при виконанні яких результуюча напруженість магнітного поля, що збуджується в площині розміщення внутрішнього соленоїда-індуктора, буде дорівнює нулю, залишилося відкритим.

Авторами роботи [11] за допомогою адекватної фізико-математичної моделі плоскої індукторної системи були отримані розрахункові співвідношення для струмів, що збуджуються в металі внутрішнього кругового соленоїда магнітним полем зовнішніх масивних котушок біфіляра.

Результати, отримані в [11], дозволяють проведення аналізу електромагнітних процесів, спрямованого на визначення екрануючої дії внутрішнього індуктора за рахунок індуктованих

струмів, порушуваних зовнішніми односпрямованими струмами в гілках обмотки біфілярної котушки.

Мета роботи

Мета цієї роботи – аналіз і чисельні оцінки індукційних ефектів в металі плоского кругового соленоїда, розташованого між гілками зовнішньої біфілярної котушки в плоскій індукторній системі, що збуджуються односпрямованими струмами в обмотках біфіляра.

Наукова новизна полягає в отриманні чисельних оцінок для струмів, що збуджуються в реальному металі плоского кругового індуктора, розміщеного між масивними обмотками біфілярної котушки з односпрямованими збуджуючими струмами. Кінцевою метою комплексу проведених досліджень є теоретичне і експериментальне обґрунтування практичної працездатності досліджуваної індукторної системи.

Аналіз електромагнітних процесів, чисельні оцінки

Для вирішення поставленого завдання розглянемо необхідні залежності з роботи [11]. Для ясності у викладі наведемо фізико-математичну модель запропонованої індукторної системи (рис. 1) з прийнятими допущеннями і визначальними межі застосування отриманих авторами [11] розрахункових співвідношень.

Сформулюємо прийняті допущення.

- Фізико-математична модель досліджуваної індукторної системи представлена на рис. 1.

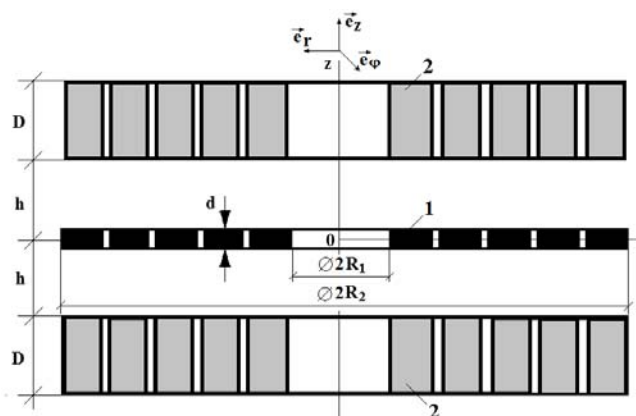


Рис. 1 – Фізико-математична модель індукторної системи,

1 - внутрішній багатовитковий соленоїд-індуктор;
2 - гілки біфіляра - плоскі багатовиткові соленоїди

- У прийнятій циліндричній системі координат об'єкт дослідження має аксіальну симетрію.

- Витки біфілярної котушки досить масивні ($D \gg R_{1,2}$) і виконані з металу, який має високу електропровідність, вони щільно прилягають один до одного, так, що їх робочі поверхні з боку індуктора-

соленоїда можна вважати суцільною поверхнею з ідеального провідника.

• По робочих поверхнях обмоток біфіляра протікає гармонійний струм з однорідною по радіусу лінійною густиною

$$j_{\varphi}(t, r, z = \pm h) = j_m \cdot \sin(\omega t) \cdot (\eta(r - R_1) - \eta(r - R_2)),$$

де $j_m = \frac{I_m}{(R_2 - R_1)}$ – амплітуда густини, I_m –

амплітуда струму, ω – циклічна частота, $\eta(r - R_{1,2})$ – ступінчасті функції Хевісайда [9].

• Витки соленоїда-індуктора виконані з металу кінцевої товщини d з кінцевої питомою електропровідністю γ і щільно прилягають один до одного, так, що їх поверхні можна вважати суцільними.

• Часові параметри збуджуючого струму задовольняють квазістационарному наближенню по Ландау $\frac{\omega}{c} \cdot l \ll 1$, де c – швидкість світла у вакуумі, l – максимальний розмір в системі [7, 8].

Просторово-часовий розподіл густини струму, індукованого в металі внутрішнього індуктора, описується наступною залежністю [11]:

$$j_i(t, r, z) = 2j_m \cdot \left(\frac{\omega\tau}{d}\right) \cdot \int_0^{\infty} f(\lambda) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \sin\left((2k+1)\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\zeta}{\left(\frac{d}{2}\right)}\right) \times$$

$$\times \frac{(-1)^k \cdot \sin(\omega t - \psi_k)}{\sqrt{(\omega\tau)^2 + \left(\left((2k+1) \cdot \frac{\pi}{2}\right)^2 + \left(\lambda \frac{d}{2}\right)^2\right)^2}} \cdot J_1(\lambda r) \lambda d\lambda$$

(1)

де $\tau = \mu_0 \gamma \left(\frac{d}{2}\right)^2$ – характерний час дифузії поля в

провідний шар з питомою електропровідністю γ і товщиною $\left(\frac{d}{2}\right)$,

$$f(\lambda) = \int_{R_1}^{R_2} r \cdot J_1(\lambda r) dr$$

– зображення однорідного радіального розподілу густини збуджуючого струму в просторі Фур'є-Бесселя [12],

$\zeta \in \left[-\frac{d}{2}, +\frac{d}{2}\right]$ – поперечна координата в металі внутрішнього індуктора,

$$\psi_k = \arctg \left(\frac{\sqrt{\left(\left((2k+1) \cdot \frac{\pi}{2}\right)^2 + \left(\lambda \frac{d}{2}\right)^2\right)}}{\omega\tau} \right) - \text{фазовий}$$

зсув просторових гармонік,

$J_1(\lambda r)$ – функція Бесселя першого роду першого порядку,

λ – параметр інтегрального перетворення Фур'є-Бесселя [12].

Як було зазначено авторами [11], в практичних обчисленнях вираз (1) трансформується в декілька аналітичних залежностей, кожна з яких описує процеси, що протікають, відповідно до умов виконуваних розрахунків.

1. Низькочастотний режим – $\omega \ll \frac{1}{\tau}$ при досить малій товщині металу внутрішнього індуктора $\left(\lambda \frac{d}{2}\right)^2 \ll \left(\left(2k+1\right) \cdot \frac{\pi}{2}\right)^2$

Відповідний граничний перехід у виразі (1) призводить до наступного виразу для густини індукованого струму:

$$j_i(t, r, z) \approx j_m \cdot \left(\frac{\omega\tau}{d}\right) \cdot \cos(\omega t) \times$$

$$\times [\eta(r - R_1) - \eta(r - R_2)] \cdot \frac{\zeta}{\left(\frac{d}{2}\right)}.$$

(2)

Аналіз виразу (2) показує, що

- часова і просторові залежності поділяються (не пов'язані між собою);
- амплітуда сигналу, що збуджується, прямо пропорційна параметру $\omega \cdot \tau \ll 1$, який визначає частотний діапазон, і обернено пропорційна товщині металу індуктора;
- часова залежність є похідна від часової залежності збуджуючого струму, а радіальний розподіл збігається з радіальним розподілом збуджуючого струму;
- поперечний розподіл індукованого струму являє собою лінійну залежність, що проходить через центральну вісь індуктора.

Відзначимо, що перші дві позиції висновків повністю узгоджуються з результатами досліджень низькочастотних електромагнітних процесів в тонкостінних металах, представлених в науковому виданні [8].

2. Високочастотний режим $\omega \gg \frac{1}{\tau}$ при досить малій товщині металу внутрішнього індуктора $\left(\lambda \frac{d}{2}\right)^2 \ll \left(\left(2k+1\right) \cdot \frac{\pi}{2}\right)^2$.

Після граничного переходу в (1) отримуємо залежність для густини індукованого струму:

$$j_i(t, r, z) \approx \frac{4J_m}{d} \sin(\omega t) [\eta(r - R_1) - \eta(r - R_2)] \times$$

$$(-1)^k \sin \left((2k+1) \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\zeta}{\left(\frac{d}{2}\right)} \right)$$

$$\times \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\left((2k+1) \frac{\pi}{2} \right)^2}{(\omega \tau)^2} \right)^2}} \quad (3)$$

З аналізу виразу (3) випливає, що

- часова і просторові залежності поділяються (не пов'язані між собою);
- амплітуда сигналу, що збуджується, істотно (в $\sim \left(\frac{4}{\omega \tau}\right)$ раз) перевищує аналогічний показник в низькочастотному часовому режимі;
- часова залежність і радіальний розподіл збігаються з відповідними аналогами для збуджуючого струму;
- поперечний розподіл визначається сумою ряду,

збіжність якого досить швидко при $\frac{\left((2k+1) \cdot \frac{\pi}{2} \right)^2}{(\omega \tau)^2} > 1$ [12].

Відзначимо, що, з фізичної точки зору, сформульовані висновки повністю узгоджуються з відомими положеннями для режиму різкого поверхневого ефекту [8].

Графічні ілюстрації поперечних розподілів густини струмів, індукованих в металі індуктора товщиною d в різних часових режимах представлені на рис. 2.

Графічні залежності на рис. 2 наочно ілюструють перехід від режиму інтенсивного проникнення порушуваних електромагнітних полів (крива 2), коли має місце просторова суперпозиція різноспрямованих струмів, що збуджуються кожним із джерел, до режиму різкого скін-ефекту (крива 3), коли індуковані струми витісняються на граничні поверхні металу внутрішнього індуктора.

Підкреслимо, що повна величина індукованого струму, визначена з виразів (1)–(3) як інтеграл по поперечній координаті $\zeta \in \left[-\frac{d}{2}, +\frac{d}{2} \right]$, дорівнює нулю у всіх часових режимах. Хоча, як видно з рис. 2, при низьких частотах нуль інтегрального струму це результат геометричного накладення індукованих струмів, а при високих частотах – це формальний результат, обумовлений однаковими, але протилежно спрямованими струмами, індукованими на поверхнях металу індуктора.

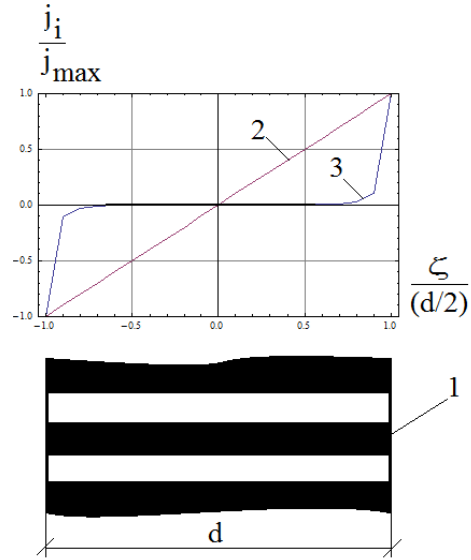


Рис. 2 – Поперечні розподіли відносних величин індукованих струмів (нормування на максимуми), 1 - внутрішній індуктор в поперечному перерізі; 2 - низькочастотний режим, $\omega \tau = 0,1$; 3 - високочастотний режим, $\omega \tau = 10$.

Узагальнюючи результати проведеного аналізу, відзначимо, що для мінімізації впливу струмів зовнішнього біфіляра на процеси у внутрішньому індукторі кращим є низькочастотний часовий режим, в якому за рахунок інтенсивного проникнення порушуваних полів просторова суперпозиція різноспрямованих індукованих струмів дає нульову сумарну величину електрорушійної сили індукції, що збуджується.

Висновки

У низькочастотному режимі інтенсивного проникнення діючих полів часова залежність струму, що збуджується, є похідна від часової залежності збуджуючого струму, а поперечний розподіл індукованого струму являє собою лінійну залежність, що проходить через центральну вісь індуктора.

У високочастотному режимі діючих полів часова залежність і радіальний розподіл струму, що збуджується, збігаються з відповідними аналогами для збуджуючого струму; поперечний розподіл індукованого струму є характерним для режиму різкого поверхневого ефекту, коли індукований струм витісняється на граничні поверхні металу.

Мінімальний вплив полів зовнішнього біфіляра на процеси у внутрішньому індукторі повинен мати місце в низькочастотному режимі, коли просторова суперпозиція різноспрямованих індукованих струмів дає в сумі нульову величину електрорушійної сили індукції, що збуджується.

Подальші перспективи – перехід до експериментів для обґрунтування практичної дієздатності дослідженої індукторної системи.

Список літератури

1. Атабеков Г. И. *Основы теории цепей*. СПб.: Энергия, 2006. 220 с.
2. Padamanabhan K., Swaminathan P. *Electronic Components*. New Deli: Laxmi Publications, 2016. 204 p.
3. *Мир электроники. Датчики: справочное пособие*. Под ред. В. М. Шарипова и Е. С. Полищука. М: Техносфера, 2012. 624 с.
4. Yalçın O. *Ferromagnetic resonance – Theory and Applications* Intech Open Publ., 2013. 239 p.
5. Никишенко А. Н., Богач Н. В. Разработка модели излучения плоской катушки *Тезисы докладов 6-й Международной научно-технической конференции "Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций "RT-2010"* Севастополь, 2010. С. 362–366.
6. Ziegler S., Woodward R. C., Lu H. H. C., Borle L. J. Current Sensing Techniques: A Review. *IEEE Sensors Journal*. 2009. Vol. 9. 4. P. 354-376. doi: 10.1109/JSEN.2009.2013914.
7. Shneerson G. A., Dolotenko M. I., and Krivosheev S. I., *Strong and Superstrong Pulsed Magnetic Field Generation*. Berlin: Walter de Gruyter, 2014. 424 p.
8. Batygin Yu., Barbashova M., Sabokar O. *Electromagnetic Metal Forming for Advanced Processing Technologies*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2018. 95 p.
9. Батыгин Ю. В., Шиндерук С. О., Гаврилова Т. В., Балбекін І. А. Розрахункові співвідношення пласкої індукторної системи з масивними котушками біфіляра. *Вісник ХНАДУ*. 2019. 87. С. 85-90. doi: 10.30977/BUL.2219-5548.2019.87.0.85.
10. Батыгин Ю. В., Гаврилова Т. В., Шиндерук С. А., Чаплыгин Е. А., Саенко В. А. Плоская индукторная система с массивными катушками бифиляра. Анализ электромагнитных процессов. *Технічна інженерія*. 2019. №2 (84). С. 115-119.
11. Батыгин Ю. В., Шиндерук С. А., Чаплыгин Е. А., Еремина Е. Ф., Безродная А. В. Плоский круговой соленоид между массивными бифилярными катушками. Расчётные соотношения. *Вісник НТУ "ХПИ"*. *Математичне моделювання в техніці та технологіях*. 2019. № 22 (1347). С. 9-15.
12. Корн Г., Корн Т. *Справочник по математике (для научных работников и инженеров)*. М.: Наука, 1973. 832 с.
2. Padamanabhan K., Swaminathan P. *Electronic Components*. Laxmi Publications, 2016. 204 p.
3. *Mir elektroniki. Datchiki: spravocnoye posobiye* [The world of electronics. Sensors: a reference manual]. Pod red. V. M. Sharipova i Ye. S. Polishchuka. M: Tekhnosfera, 2012. 624 p.
4. Yalçın O. *Ferromagnetic resonance – Theory and Applications*. Intech Open Publ., 2013. 239 p.
5. Nikishenko A. N., Bogach N. V. Razrabotka modeli izlucheniya ploskoy katushki. [Development of a model of radiation of a flat coil.] *Tezisy dokladov 6-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Sovremennyye problemy radiotekhniki i telekommunikatsiy "RT-2010"* [Abstracts of the 6th International Scientific and Technical Conference "Modern Problems of Radio Engineering and Telecommunications "RT-2010"]. Sevastopol', 2010, pp. 362–366.
6. Ziegler S., Woodward R. C., Lu H. H. C., Borle L. J. Current Sensing Techniques: A Review. *IEEE Sensors Journal*, 2009, Vol. 9, 4, pp. 354-376, doi: 10.1109/JSEN.2009.2013914.
7. Shneerson G. A., Dolotenko M. I., and Krivosheev S. I., *Strong and Superstrong Pulsed Magnetic Field Generation*. Berlin. Walter de Gruyter, 2014. 424 p.
8. Batygin Yu., Barbashova M., Sabokar O. *Electromagnetic Metal Forming for Advanced Processing Technologies*. Cham, Switzerland. Springer International Publishing AG. 2018. 95 p.
9. Batyhin Yu. V., Shynderuk S. O., Gavrylova T. V., Balbekin I. A. Rozrakhunkovi spivvidnoshennya plaskoyi induktornoyi systemy z masyvnyimi kotushkamy bifilyara. [Calculated relations of flat inductor system with massive bifilar coils.] *Bulletin of KhNADU*, 2019, 87, pp. 85-90, doi: 10.30977/BUL.2219-5548.2019.87.0.85.
10. Batygin Yu. V., Gavrilova T. V., Shinderuk S. A., Chaplygin Ye. A., Sayenko V. A. Ploskaya induktornaya sistema s massivnyimi katushkami bifilyara. Analiz elektromagnitnykh protsessov. [Flat inductor system with massive bifilar coils. Analysis of electromagnetic processes.] *Technical engineering*, 2019, 2 (84), pp. 115-119.
11. Batygin Yu. V., Shinderuk S. A., Chaplygin Ye. A., Yeryomina Ye. F., Bezrodnaya A. V. Ploskiy krugovoy solenoid mezhd massivnyimi bifilyarnymi katushkami. Raschotnyye sootnosheniya. [Flat circular solenoid between massive bifilar coils. Design ratios]. *Bulletin of NTU "KhPI". Mathematical modeling in engineering and technology*, 2019, 22 (1347), pp. 9-15.
12. Korn T., Korn G. *Spravochnik po matematike (dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov)* [Mathematical Handbook for Scientists and Engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 832 p.

References (transliterated)

1. Atabekov G. I. *Osnovy teorii tsepey* [Fundamentals of the theory of chains]. SPb. Energiya, 2006. 220 p.

Відомості про авторів (About authors)

Батыгин Юрій Вікторович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, завідувач кафедри фізики, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-1278-5621; e-mail: yu.v.batygin@gmail.com.

Yuriy Batygin – Doctor of Science, Professor, Head of the Department of Physics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-1278-5621; e-mail: yu.v.batygin@gmail.com.

Ерьоміна Олена Федорівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри фізики, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-8123-1104; e-mail: elena.yeryomina@gmail.com.

Olena Yeryomina – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Assistant Professor, Department of Physics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-8123-1104; e-mail: elena.yeryomina@gmail.com.

Шиндерук Світлана Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри фізики, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-6354-4174; e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net

Svitlana Shinderuk – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Assistant Professor, Department of Physics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-6354-4174; e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net

Чапльгін Євген Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри фізики, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-1448-6091; e-mail: chaplygin.e.a@gmail.com.

Evgeniy Chaplygin – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Assistant Professor, Department of Physics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-1448-6091; e-mail: chaplygin.e.a@gmail.com.

Бенсбаа Бадр Еддін – студент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна; e-mail: badrbensbaa5@gmail.com

Bensbaa Badr Eddin – student, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; e-mail: badrbensbaa5@gmail.com

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Батигін Ю. В., Єрьоміна О. Ф., Шиндерук С. О., Чапльгін Є. О., Бенсбаа Б. Е. Плоский круговой соленоїд між масивними біфілярними котушками. Аналіз електромагнітних процесів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 1 (7). С. 3-8. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.01.

Please cite this article as:

Batygin Yu., Yeryomina O., Shinderuk S., Chaplygin E., Bensbaa B. E. Flat circular solenoid between massive bifilar coils. Analysis of electromagnetic processes. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 1 (7), pp. 3-8, doi:10.20998/2413-4295.2021.01.01.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Батигин Ю. В., Ерёмина Е. Ф., Шиндерук С. А., Чапльгин Е. А. Бенсбаа Б. Е. Плоский круговой соленоид между массивными бифилярными катушками. Анализ электромагнитных процессов. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 1 (7). С. 3-8. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.01.

АННОТАЦІЯ Представлены анализ и численные оценки индукционных эффектов в металле плоского кругового соленоида, расположенного между ветвями внешней бифилярной катушки в плоской индукторной системе, возбуждаемой однонаправленными токами в обмотках бифиляра. Такое устройство, конструктивное исполнение которого впервые было предложено ранее авторами настоящей работы, представляет практический интерес для схем оборудования магнитно-импульсной обработки металлов. Применение рассматриваемой индукторной системы дает возможность минимизировать влияние индукционных эффектов на электромагнитные процессы в металле внутреннего индуктора. Получены численные оценки для индуцированных токов, возбуждаемых в металле внутреннего кругового индуктора, размещённого между внешними обмотками бифилярной катушки. Показано, что в низкочастотном режиме действующих полей временная зависимость возбуждаемого тока есть производная от временной зависимости возбуждающего тока, а поперечное распределение тока в металле внутреннего индуктора представляет собой линейную зависимость, проходящую через центральную ось индуктора. В высокочастотном режиме действующих полей временная зависимость и радиальное распределение возбуждаемого тока совпадают с соответствующими аналогами для возбуждающего тока, а поперечное распределение индуцированного тока характерно для резкого поверхностного эффекта, когда индуцированный ток вытесняется на граничные поверхности металла. Доказано, что минимальное влияние полей внешнего бифиляра на электромагнитные процессы во внутреннем индукторе должно наблюдаться в низкочастотном режиме, когда пространственная суперпозиция разнонаправленных индуцированных токов даёт в сумме нулевую величину возбуждаемой электродвижущей силы индукции. Результаты анализа на основе проведенных конкретных вычислений направлены на поиск условий успешной технической реализации предложенной индукторной системы. Весьма перспективным в направлении последующих исследований видится создание работоспособных моделей предложенных индукторных систем и проведение экспериментов по определению реальных условий их максимальной эффективности.

Ключевые слова: бифилярная катушка; индукторная система; электромагнитные процессы; однонаправленные токи; пространственно-временная зависимость; численные оценки; расчетная модель

Надійшла (received) 01.03.2021